

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

Гараненко Тетяна Романівна

УДК 621.7.043

## ДИСЕРТАЦІЯ

«Розробка процесу формоутворення порожнистої лопатки з титанових сплавів  
для газотурбінних двигунів»

05.03.05 – «Процеси та машини обробки тиском»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Т.Р. Гараненко

Науковий керівник      д.т.н., проф. Тітов Вячеслав Андрійович

Київ 2021

## АНОТАЦІЯ

Гараненко Т.Р. Розробка процесу формоутворення порожнистої лопатки з титанових сплавів для газотурбінних двигунів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском». – КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2021.

В дисертації вирішена актуальна науково-технічна задача розробки процесу формоутворення фрагменту порожнистої лопатки газотурбінного двигуна з врахуванням закономірностей в'язкопластичного деформування титанових сплавів в ізотермічних умовах.

Робота виконувалась відповідно до тематичних планів держбюджетних і науково-дослідних робіт Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

На основі аналізу наукових публікацій сформульовані недоліки існуючих процесів виготовлення та визначені основні напрямки розвитку конструкторсько-технологічних рішень при формоутворенні порожнистих лопаток з листових титанових сплавів. Запропонована і обґрунтована ідея визначення технологічних параметрів процесу при в'язкопластичному формоутворенні типового фрагмента регулярного перерізу пера порожнистої лопатки з наступним використанням цих параметрів для реалізації технологічних процесів виготовлення лопаток ГТД.

Запропоновано конструкцію фрагменту порожнистої металевої лопатки вентилятора гофрового типу, враховуючи фактор зниження маси пера лопатки за рахунок конструктивно - технологічних рішень при збереженні експлуатаційних параметрів (властивостей статичної та динамічної міцності). Проведено порівняльний статичний та динамічний аналіз експлуатаційних навантажень лопатки вентилятора суцільної та порожнистої конструкції з використанням програмного комплексу ANSYS. В процесі моделювання розглядалось регулярна частина пера лопатки без кінцевих зон (хвостова частина та кінцева пера).

Показано, що радіальні та еквівалентні напруження від інерційних сил при обертанні лопаток на 10-15% нижче для порожнистих лопаток. На основі виконаного аналізу доведено доцільність вибраної конструкції поперечного перерізу фрагменту порожнистої лопатки.

Відпрацювання технології отримання типового перерізу ґрунтується на отриманні порожнистої лопатки обмеженої довжини експериментально. Технологія виготовлення порожнистих лопаток ґрунтується на поєднанні двох процесів зварювання під тиском і формування пера лопатки в ізоермічних умовах.

Розроблено методику та установку для експериментального дослідження формоутворення оболонок в умовах надпластичності, що дозволяє визначати необхідні параметри деформації.

Розроблено метод експериментально - аналітичної побудови кривих деформування на підставі випробувань на згин. В основу методу покладено вирішення системи рівнянь рівноваги моментів внутрішніх та зовнішніх сил при чистому згині заготовок. Для підтвердження коректності отриманих в'язкопластичних моделей для титанового сплаву ВТ6 було проведено порівняння з даними, які використовуються в науковій практиці. Похибка визначення інтенсивності напружень в діапазоні швидкостей деформацій  $10^{-3} \dots 10^{-4} (с^{-1})$  не перевищує 10...14%. Оцінка похибки розрахунку напружень з використанням кривої залежності  $\sigma(\varepsilon)$  по даним DEFORM в порівнянні з отриманими залежностями по розробленому методу, в інтервалі їх перекриття  $(-1 > \lg \varepsilon > -2)$  не перевищує 16-20%. По характеру поведінки кривих отриманих по розробленій методиці залежність доповнює залежність, яка побудована по даним DEFORM та її продовжує.

Результати дослідження показали, що криві в'язкопластичного деформування цих матеріалів, можна використовувати для розрахунку технологічних процесів.

Врахована особливість визначенні величини граничної накопиченої пластичної деформації, що враховує показник жорсткості схеми напруженого стану. Експериментально встановлено, що максимальна величина накопичених пластичних деформацій для титанового сплаву ОТ4-0 складає 1,9 та відповідає інтервалу температур  $830 \pm 5^{\circ}\text{C}$  для відповідних швидкісних умов деформування.

Вперше, для процесу формоутворення конструкції поперечного перерізу порожнистої лопатки гофрового типу тиском газового середовища, встановлено фактори, що обмежують процес деформування:

- максимальні накопичені пластичні деформації виникають в стінці гофрового наповнювача в краєвій локальній зоні, що прилягає до місця з'єднання наповнювача з обшивкою. Їх величина залежить від відносної висоти гофра. В цьому місці виникає руйнування при формоутворенні при досяганні максимальних пластичних накопичених деформації граничної величини.

- утворення недоформовки обшивок утруднене в місці з'єднання обшивки і говра в наслідок опору деформуванню гофрового наповнювача.

Показано, що цей фактор обмежує висоту поперечного перерізу порожнистої лопатки. Гранична висота поперечного перерізу порожнистої лопатки залежить від відношення товщин гофра та обшивки.

За результатами відпрацювання комплексної технології виготовлення фрагменту порожнистої лопатки розроблено технічні рекомендації щодо реалізації процесів виготовлення порожнистих лопаток, які передані для впровадження на підприємства ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес» та АТ «Мотор Січ».

У роботах виконаних у співавторстві, здобувачеві належить отримання наукових результатів, які складають наукову новизну та практичну значимість при створенні математичних моделей процесу пластичного формоутворення фрагменту порожнистої лопатки та при аналізі результатів чисельного розрахунку, розробці експериментально-аналітичного методу визначення в'язкопластичної моделі деформування титанового сплаву в ізотермічних умовах, розробці та реалізації експериментального методу визначення граничних деформацій при в'язкопластичному формоутворенні листових



титанових сплавів при гарячих пластичних деформаціях в ізотермічних умовах для використання в критерії деформівності Кокрофта-Летема-Оха, постановці та аналізу результатів експериментальних робіт, розробці структури технологічного процесу, узагальненню нових технічних рішень, розробки рекомендацій по впровадженню процесів та їх апробації на підприємствах галузі.

**Ключові слова:** порожниста лопатка вентилятора, в'язкопластичне деформування, модель матеріалу, зварювання тиском, надпластичність, титанові сплави, ізотермічні умови.

### **Abstract**

Garanenko T.R. Development of the process of forming a hollow blade from titanium alloys for gas turbine engines. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.03.05 "Processes and machines of processing by pressure". - KPI of Igor Sikorsky, Kyiv, 2021.

The dissertation solves the actual scientific and technical problem of developing the process of forming a fragment of the hollow blade of a gas turbine engine, taking into account the laws of viscoplastic deformation of titanium alloys in isothermal conditions.

The work was performed in accordance with the thematic plans of state budget and research works of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic of Igor Sikorsky".

Based on the analysis of scientific publications, the shortcomings of the existing manufacturing processes are formulated and the main directions of development of design and technological solutions in the formation of hollow blades from sheet titanium alloys are identified. The idea of determining the technological parameters of the process in viscoplastic molding of a typical fragment of the regular cross-section of the hollow blade feather with the subsequent use of these parameters for the implementation of technological processes for the manufacture of gas turbine blades is proposed and substantiated.

The design of a fragment of a hollow metal blade of a fan of corrugated type is offered, taking into account the factor of decrease in weight of a blade feather at the expense of constructive - technological decisions at preservation of operational parameters (properties of static and dynamic durability). A comparative static and dynamic analysis of the operating loads of the fan blade of solid and hollow construction was performed using the ANSYS software package. In the simulation process, the regular part of the scapula feather without end zones (tail part and end feather) was considered. It is shown that the radial and equivalent stresses from inertial

forces during rotation of the blades are 10-15% lower for hollow blades. Based on the analysis, the feasibility of the selected cross-sectional structure of the hollow blade fragment is proved.

The development of the technology of obtaining a typical cross-section is based on obtaining a hollow blade of limited length experimentally. The technology of manufacturing hollow blades is based on a combination of two processes of pressure welding and forming in the isothermal sinks.

A method and installation for experimental study of shell formation under conditions of superplasticity have been developed, which allows to determine the necessary deformation parameters.

The method of experimental - analytical construction of deformation curves on the basis of bending tests is developed. The method is based on the solution of the system of equations of equilibrium of moments of internal and external forces at pure bending of blanks. To confirm the correctness of the obtained viscoplastic models for the titanium alloy VT6, a comparison was made with the data used in scientific practice. The variation in the value of the stress intensity in the range of deformation rates does not exceed 10 ... 14%. Evaluation of the loss of growth in the field of crooked fallowness according to the DEFORM data in the case of detached fallow lands according to the broken-down method, in the interval of these there is no reduction of 16-20%. By the nature of the behavior of the curves obtained by the developed method, the dependence complements the dependence, which is built on the data of Deform and continues it.

The method of experimental - analytical inducement of curves of deformation at the stage of production of vibrobuvar on a zgin has been developed. The method is based on the revision of the system and the equal and equal moments of the internal and external forces with a clean zgin of workpieces. To confirm the correctness of viscoplastic models for titanium alloy VT6, we have carried out a test of data, which is useful in scientific practice.

The results of the study showed that the curves of viscoplastic deformation of these materials can be used to calculate technological processes.

The peculiarity of determining the value of the ultimate accumulated plastic deformation is taken into account, which takes into account the stiffness index of the stress state scheme. It is experimentally established that the maximum value of accumulated plastic deformations for titanium alloy OT4-0 is 1.9 and corresponds to the temperature range for the corresponding velocity conditions of deformation.

For the first time, for the process of forming the cross-sectional structure of the hollow blade of the corrugated type by the pressure of the gas medium, the factors limiting the deformation process are established:

- the maximum accumulated plastic deformations occur in the wall of the corrugated filler in the local edge zone adjacent to the junction of the filler with the cladding. Their value depends on the relative height of the corrugation. In this place there is a destruction at molding at achievement of the maximum plastic accumulated deformations of limiting size.

- the formation of under-molding of the cladding is difficult at the junction of the cladding and speech due to resistance to deformation of the corrugated filler.

It is shown that this factor limits the height of the cross section of the hollow blade. The maximum height of the cross section of the hollow blade depends on the ratio of the thicknesses of the corrugation and the skin.

Based on the results of testing the complex technology of hollow blade fragment manufacturing, technical recommendations were developed for the implementation of hollow blade manufacturing processes, which were transferred for implementation to the enterprises of Ivchenko-Progress and Motor Sich JSC.

In the works performed in co-authorship, the applicant should obtain scientific results that are scientific novelty and practical significance in creating mathematical models of the process of plastic formation of a hollow blade fragment and in analyzing the results of numerical calculation, development of experimental-analytical method for viscoplastic deformation model. isothermal conditions, development and implementation of an experimental method for determining the limit deformations in viscoplastic forming of titanium sheet alloys under hot plastic deformations in isothermal conditions for use in the Cockcroft-Letem-Okha deformability criterion,

formulation and analysis of experimental results, development of technological process structure new technical solutions, development of recommendations for the implementation of processes and their testing at enterprises in the industry.

**Keywords:** hollow fan blade, viscoplastic deformation, material model, pressure welding, superplasticity, titanium alloys, isothermal conditions.

### Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Тітов В.А. Дослідження параметрів процесу ізотермічного пресування заготовок з титанових сплавів / Тітов В.А., Злочевська Н.К., Лавріненко А.Д., Гараненко Т.Р. // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Нові рішення в сучасних технологіях. – 2011. - №46 – с. 67-73. – ISSN 2079-5459
2. Мыленко А.А. Повышение предела выносливости широкохордных лопаток вентилятора газотурбинных двигателей в поле ультразвука / А.А. Мыленко, Рожковская Э.Л., Гараненко Т.Р. // Вестник двигателестроения. – 2014. - №1. – с. 67 – 70. - ISSN 1727-0219.
3. Гараненко Т.Р. Численное исследование широкохордных полых рабочих лопаток вентилятора. / Гараненко Т.Р., Прибора Т.И., Березовский Е.К. // Вестник двигателестроения. – 2016. - №1. – с. 18 – 23. - ISSN 1727-0219.
4. Титов В.А. Метод експериментально-аналитического построения кривых деформирования материалов при испытании на изгиб. Сообщение 1. Титов В.А., Гараненко Т.Р. // Обработка материалов давлением. – 2015. - № 2. – С. 74 – 80. - ISSN 2076-2151.
5. Титов В.А. Особенности построения вязкопластических моделей металлов при испытаниях на изгиб. Сообщение 2. / Титов В.А., Гараненко Т.Р. // Обработка материалов давлением..– 2016. - № 1(42). – С. 45 – 51. - ISSN 2076-2151.
6. Титов В.А. Особенности технической подготовки процесса изотермической штамповки моноколес / В.А. Титов, В.Ф. Мозговой, А.Ю. Басов, А.В. Титов, Т.Р. Гараненко, О.Н. Лысенко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2016. - № 3 (78). – С. 146-152. - ISSN 2305-9001
7. Титов В.А. Некоторые закономерности изотермического вязкопластического формообразования мембраны из алюминиевых сплавов / В.А. Титов, А.С. Рехта, Т.Р. Гараненко / Обработка материалов давлением. – 2017. - №2 (45). – С. 30-35. - ISSN 2076-2151.

8. Розробка експериментальної методики та оцінки границі пластичної деформації титанового сплаву ОТ4-0 в умовах надпластичності / Тітов В.А., Гараненко Т.Р. // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. Мащини і пластична деформація металу. – 2018. – с (273-278).

9. Development of an experimental technique and evaluate limit of plastic deformation of titanium alloy OT-4 under superplastic conditions / Vyacheslav Titov, Tetiana Garanenko // Solid State Phenomena – 2019, vol. 291, pp 183-192 (**Іноземне видання, входить до Scopus**)

10. Конструкторсько – технологічні рішення типових елементів порожнистих лопаток // Тітов В.А., Гараненко Т.Р. / Проблеми тертя та зношування - 2019, - 3(84), - с. 69-75. – ISSN 0370-2197

11. Тітов В.А. Экспериментально-аналитический метод построения модели вязкопластичного материала для титанового сплава ВТ6 на основе испытаний на изгиб / В.А. Титов, Т.Р.Гараненко, А.В. Титов // Mechanics and Advanced Technologies - 2019, - №3 (87), - с. 26-37.- ISSN 2521-1943.

12. Гараненко Т.Р. Розробка конструкторсько-технологічних рішень виготовлення порожнистої лопатки з титанових сплавів / Т.Р. Гараненко / Обработка материалов давлением. – 2019. - №2 (45). – С. 128-135. - ISSN 2076-2151.

## Зміст

Перелік умовних позначень.....	16
Вступ.....	17
1 Аналітичний огляд.....	25
1.1 Дослідження в області конструкції і технології виготовлення порожнистої широкохордної лопатки вентиляторів для турбореактивних двоконтурних двигунів.....	25
1.2 Зварювання тиском.....	37
1.3 Формування виробів в умовах короткочасної повзучості та надпластичності.....	48
1.4 Висновки до розділу 1.....	59
2 Конструкторсько-технологічний розділ.....	61
2.1 Класифікатор конструкторсько - технологічних рішень типових елементів порожнистих лопаток.....	61
2.2 Вибір, обґрунтування та проектування дослідного зразка порожнистої лопатки.....	69
2.3 Структура технологічного процесу отримання порожнистої лопатки.....	83
2.4 Проектування оснащення для виготовлення фрагменту порожнистої лопатки.....	85
2.5 Висновки до розділу 2.....	88
3 Методика досліджень.....	90
3.1 Узагальнена методика досліджень дисертаційної роботи.....	90
3.2 Методика теоретичних досліджень.....	92
3.3 Методика експериментальних досліджень.....	96
3.3.1 Методика формоутворення мембрани з листового матеріалу в ізотермічних умовах.....	96
3.3.1.1 Загальні положення та аналітичні залежності процесу формоутворення мембрани.....	96



3.3.1.2	Заготовки, матеріали для деформування.....	98
3.3.1.3	Схема процесу, експериментальне обладнання, та особливості формоутворення мембрани.....	99
3.3.1.4	Методика виміру деформацій в куполі мембрани.....	104
3.3.2	Методика визначення режимів з'єднання заготовки з титанових сплавів методом зварювання тиском.....	108
3.3.2.1	Загальні положення. Зразки зварних з'єднань. Заготовки. Матеріали.....	108
3.3.2.2	Експериментальний пристрій для зварювання тиском зразків.....	109
3.3.2.3	Розрахунок діаграми навантаження.....	111
3.3.2.4	Методика визначення якості з'єднання.....	114
3.3.3	Методика виконання експериментальних робіт по виготовленню фрагменту порожнистої лопатки ГТД.....	115
3.4	Висновки до розділу 3.....	118
4	Теоретичний розділ.....	120
4.1	Розробка експериментально – аналітичного методу побудови моделі в'язкопластичного матеріалу на основі випробувань на згин.....	120
4.1.1	Розробка загальної структури експериментально – аналітичного методу визначення моделі матеріалу за результатами випробувань на згин.....	120
4.1.2	Розробка кінематичної моделі чистого згину широкої заготовки.....	121
4.1.3	Отримання визначальних рівнянь в загальному вигляді.....	123
4.1.4	Отримання визначальних рівнянь спрощеної моделі в'язкопластичного матеріалу.....	129
4.1.5	Експериментальне визначення розрахункових величин.....	132

4.1.6	Побудова моделей в'язкопластичного матеріалу для титанового сплаву ВТ6.....	136
4.2	Визначення граничного значення (величини) деформівності титанового сплаву в умовах в'язкопластичного формоутворення.....	139
4.2.1	Особливості використання критерію руйнування Кокрофта-Летема при в'язкопластичному формоутворенні.....	139
4.2.2	Експериментальне визначення граничної величини наконечної пластичної деформації при формоутворенні мембрани з листового матеріалу.....	141
4.3	Висновки до розділу 4.....	146
5	Розрахунок формоутворення порожнистої лопатки чисельними методами.....	148
5.1	Постановка задачі.....	148
5.2	Розрахунок формоутворення порожнистої лопатки без наповнювача.....	150
5.3	Розрахунок формоутворення порожнистої лопатки сумісно з наповнювачем.....	152
5.3.1	Аналіз геометричних параметрів перерізу фрагменту порожнистої лопатки.....	152
5.3.2	Аналіз результатів розрахунку формоутворення фрагменту порожнистої лопати сумісно з наповнювачем.....	157
5.4	Висновки до розділу 5.....	167
6	Експериментальні дослідження.....	168
6.1	Експериментальне визначення режимів процесу виконання з'єднань методом зварюванням тиском на типових елементах (зразках).....	168
6.1.1	Проведення експерименту.....	168
6.1.2	Умови експерименту.....	169

6.1.3	Результати експерименту.....	169
6.1.4	Механічні випробування.....	174
6.1.5	Дослідження макроструктури.....	176
6.1.6	Дослідження мікроструктури.....	179
6.2	Експериментальне дослідження процесу формоутворення фрагментів порожнистої лопатки.....	185
6.3	Висновки до розділу 6.....	187
	Загальні висновки.....	188
	Список використаних джерел.....	192
	Додаток А.....	212
	Додаток Б.....	215

### **Перелік умовних позначень**

ГТД – газотурбінний двигун

ТРДД - турбореактивний двоконтурний двигун

НДФ - надпластичне формування

НП – надпластичність

ЗТ - зварювання тиском

## Вступ

Сучасні тенденції розвитку конструкції авіаційних двигунів показують, що одним із напрямків забезпечення їх ефективності являється використання великогабаритних лопаток вентилятора зниженої маси. Одним з перспективних напрямків розвитку конструкції таких лопаток є використання лопаток порожнистого типу.

Для сучасних газотурбінних двигунів (ГТД) довжина порожнистої лопатки досягає 800-1200мм, а величина хорди пера лопатки, як правило, відцентровано збільшується для забезпечення необхідних частотних характеристик. При цьому конструкція поперечного перерізу залишається незмінною (типовою).

Для забезпечення максимальної міцності пера порожнистої лопатки її конструкція виконується з листових напівфабрикатів титанових сплавів.

Основними складовими операціями комплексного технологічного процесу являється операції пластичного формоутворення та з'єднання окремих вихідних заготовок зварюванням під тиском (дифузійне зварювання).

Попередніми дослідженнями показано, що виготовлення пера лопатки такого типу доцільно виконувати методами пластичного формоутворення. Враховуючи, що величина локальних деформацій при формоутворенні досягає 80-120%, процеси реалізуються в умовах надпластичності або короткочасної повзучості, які характерні для в'язкопластичної моделі деформування заготовок в ізотермічних умовах.

В дисертації вирішена актуальна науково-технічна задача розробки процесу пластичного формоутворення в ізотермічних умовах порожнистої лопатки з листових титанових сплавів для газотурбінних двигунів.

Основною науковою ідеєю при розв'язання поставленої задачі є визначення параметрів процесу при в'язкопластичному формоутворенні типового фрагмента регулярного перерізу пера порожнистої лопатки з наступним використанням цих параметрів для розроблення технічних рекомендацій для реалізації процесів виготовлення лопаток ГТД.

**Мета дослідження** - розробка процесу формоутворення в умовах надпластичності фрагменту конструкції порожнистої лопатки з титанових сплавів для газотурбінних двигунів

**Задачі дослідження:**

1. На основі аналізу сучасного стану і перспектив розвитку процесів пластичного формоутворення порожнистих лопаток ГТД з листових заготовок титанових сплавів сформулювати їх недоліки та визначити напрямки розвитку, мету і основні задачі дослідження;
2. Розробити комплексну методику теоретичного та експериментального дослідження параметрів процесу пластичного формоутворення фрагменту порожнистої лопатки;
3. Розробити класифікацію та виконати аналіз конструкторсько - технологічних рішень порожнистих вентиляторних лопаток, вибрати та обґрунтувати конструкцію фрагменту порожнистої лопатки для наступного відпрацювання процесу його виготовлення;
4. Виконати чисельне моделювання процесу пластичного формоутворення фрагменту порожнистої лопатки, визначити граничні можливості процесу та напрямки їх підвищення;
5. Розробити експериментально-аналітичний метод визначення в'язко-пластичної моделі деформування титанового сплаву в ізотермічних умовах;
6. Експериментально встановити границю деформівності титанового сплаву в умовах в'язкопластичного формоутворення;
7. Експериментально відпрацювати процес формоутворення фрагменту порожнистої лопатки, запропонувати та реалізувати нові технічні рішення, що забезпечують його ефективність;
8. Узагальнити технічні рішення та розробити технологічні рекомендації з їх впровадження. Провести апробацію процесів на підприємствах галузі.

**Об'єкт дослідження** – процес формоутворення фрагменту конструкції порожнистої лопатки з титанових сплавів в ізотермічних умовах.

**Предмет дослідження** – закономірності в'язкопластичного деформування титанових сплавів в ізотермічних умовах.

**Методи дослідження.** В основу роботи покладено системний аналіз і комплексний розгляд взаємозв'язку технологічних параметрів процесу формоутворення фрагменту конструкції порожнистої лопатки з особливостями в'язкопластичного деформування титанових сплавів в ізотермічних умовах.

Моделювання пластичного формоутворення фрагменту конструкції порожнистої лопатки виконано чисельним методом скінчених елементів з використанням CAD/CAE DEFORM-3D та QFORM.

Для забезпечення точності розрахунку розроблено експериментально-аналітичний метод визначення в'язкопластичної моделі матеріалу на основі випробувань на чистий згин при температурно -швидкісних умовах процесу формоутворення. Встановлення зв'язку між інтенсивностями напружень та інтенсивностями швидкостей деформацій в моделі матеріалу здійснено шляхом використання фундаментальних положень теорії пластичної течії з описом полів швидкостей руху металу в осередку деформації.

Граничний стан заготовок при формоутворенні визначався з використанням теорії деформівності на основі моделі граничних деформацій – нормалізованого критерію Кокрофта-Летема-Оха. Величина граничної деформації визначалась експериментально для двовісного напруженого стану при розтягуванні в ізотермічних умовах листових заготовок тиском газового середовища.

Достовірність розроблених математичних моделей та результатів чисельного аналізу підтверджена результатами експериментальних досліджень та порівнянням з результатами в публікаціях інших авторів.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

1. Вперше розроблений метод експериментально-аналітичного визначення моделі ізотермічного в'язкопластичного деформування матеріалу на основі випробувань на згин. В основу методу покладено вирішення системи рівнянь

рівноваги моментів сил при чистому згині заготовок. Рівняння для знаходження лінійних коефіцієнтів при апроксимації моделі матеріалу у вигляді ірраціонального поліному восьмого ступеня, отримані теоретично на основі кінематичної моделі чистого згину, яка зв'язує геометричні параметри заготовки з компонентами тензора швидкостей деформацій матеріалу. Для визначення системи рівнянь експериментально визначають залежність зміни внутрішнього радіусу заготовки від часу для заданих умов ізотермічного деформування та величини постійного зовнішнього моменту.

2. Запропоновано для оцінки граничної величини накопиченої пластичної деформації для ізотермічних умов гарячого деформування в критерії руйнування Кокрофта-Латема-Оха, використання результатів експериментального формоутворення мембрани з листового матеріалу з показником жорсткості схеми напруженого стану +2 в центрі заготовки. Експериментально встановлено, що максимальна величина накопичених пластичних деформацій для титанового сплаву ОТ4-0 складає 1,9 та відповідає інтервалу температур  $830 \pm 5^\circ\text{C}$  для відповідних швидкісних умов деформування.

3. Вперше, для процесу формоутворення конструкції поперечного перерізу порожнистої лопатки гофрового типу тиском газового середовища, встановлено фактори, що обмежують процес деформування:

- максимальні накопичені пластичні деформації виникають в стінці гофрового наповнювача в краєвій локальній зоні, що прилягає до місця з'єднання наповнювача з обшивкою. Їх величина залежить від відносної висоти гофра;

- утворення недоформовки обшивок в місці з'єднання обшивки і гофра в наслідок опору деформуванню гофрового наповнювача. Показано, що цей фактор обмежує висоту поперечного перерізу порожнистої лопатки. Гранична висота поперечного перерізу порожнистої лопатки залежить від відношення товщин гофра та обшивки.

### **Практичне значення отриманих результатів:**

1. Запропонована структура технологічного процесу виготовлення порожнистих лопаток з титанових сплавів, яка включає операції розкрою



заготовок, нанесення захисного покриття на поверхні заготовок, збирання заготовок в пакет, дифузійне зварювання під тиском, формоутворення пера лопатки в ізотермічних умовах тиском газового середовища. Експериментально відпрацьовані режими реалізації основних операцій технологічного процесу на фрагменті пера лопатки;

2. Розроблена методика розрахунку та модель процесу пластичного формоутворення порожнистої лопатки чисельними методами в програмному комплексі Deform у в'язкопластичній постановці;

3. З використанням запропонованого експериментально-аналітичного методу на основі випробувань на згин визначені моделі деформування в'язкопластичного матеріалу для листових титанових сплавів ВТ6 та ОТ4-1. Коректність моделей перевірена експериментально;

4. Для аналізу стійкості ізотермічного в'язкопластичного процесу формоутворення фрагменту порожнистої лопатки при чисельному розрахунку використаний модифікований критерій руйнування Кокрофта-Летема-Оха. Для оцінки граничного стану матеріалу в ізотермічних умовах деформування розроблена методика визначення величини граничної пластичної деформації при випробуваннях матеріалу на двовісний розтяг при формоутворенні мембрани з листового матеріалу газовим середовищем;

5. Експериментально визначені та обґрунтовані режими дифузійного зварювання під тиском листів пакету заготовок. Розроблено технологічне оснащення для відпрацювання режимів та з'єднання пакету заготовок дифузійним зварюванням під тиском;

6. Розроблена конструкція та виготовлено технологічне оснащення для в'язкопластичного формоутворення в ізотермічних умовах під тиском газового середовища фрагменту порожнистої лопатки та мембрани, яке використовується також в навчальному процесі;

7. Результати роботи використані в навчальному процесі при викладанні дисциплін «Технологія конструкційних матеріалів» та «Технологія гарячого штампування»;

8. За результатами відпрацювання комплексної технології виготовлення фрагменту порожнистої лопатки розроблено технічні рекомендації щодо реалізації процесів виготовлення порожнистих лопаток, які передані для впровадження на підприємства ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес» та АТ «Мотор Січ». Очікуєий економічний ефект від впровадження складає 1,5 млн. грн.

### **Особистий внесок здобувача.**

Здобувачем на основі аналізу наукових публікацій сформульовані недоліки існуючих процесів виготовлення та визначені основні напрямки розвитку конструкторсько-технологічних рішень при формоутворенні порожнистих лопаток з листових титанових сплавів. Запропонована і обґрунтована ідея визначення технологічних параметрів процесу при в'язкопластичному формоутворенні типового фрагмента регулярного перерізу пера порожнистої лопатки з наступним використанням цих параметрів для реалізації технологічних процесів виготовлення лопаток ГТД.

У роботах виконаних у співавторстві, здобувачеві належить отримання наукових результатів, які складають наукову новизну та практичну значимість при створенні математичних моделей процесу пластичного формоутворення фрагменту порожнистої лопатки та при аналізі результатів чисельного розрахунку, розробці експериментально-аналітичного методу визначення в'язкопластичної моделі деформування титанового сплаву в ізотермічних умовах, розробці та реалізації експериментального методу визначення граничних деформацій при в'язкопластичному формоутворенні листових титанових сплавів при гарячих пластичних деформаціях в ізотермічних умовах для використання в критерії деформівності Кокрофта-Летема-Оха, постановці та аналізу результатів експериментальних робіт, розробці структури технологічного процесу, узагальненню нових технічних рішень, розробки рекомендацій по впровадженню процесів та їх апробації на підприємствах галузі.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Робота виконувалась відповідно до тематичних планів держбюджетних і науково-дослідних робіт Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за темами: «Створення технологій пластичного деформування гомогенних та порошкових матеріалів в умовах надпластичності наукоємних виробів» (№2938-р; код державної реєстрації №ДР 0116U000000), 2017-2018 рр, здобувач приймав участь у виконання розділів 1,2,3,4; «Дослідження процесів структуроутворення та створення теорії інтенсивного пластичного деформування алюмінієво-літєвих та титанових сплавів» (№2315-р; код державної реєстрації №ДР 0107U002407), 2010-2012 рр, здобувач приймав участь у виконання розділів 1 та 8; «Створення теоретичних основ ресурсозберігаючої технології ізотермічного формоутворення в широкому діапазоні температур та швидкостей деформацій тонкостінних елементів виробів машинобудування» (№2612-р; код державної реєстрації №ДР 0113U001912), 2013-2015 рр, здобувач приймав участь у виконання розділів 1,2,8; «Створення методів проектування процесів формоутворення конструкцій машинобудування при в'язкопластичному деформуванні гомогених евтектичнозміцнених та порошкових матеріалів» (№2906-ф; код державної реєстрації №ДР 0116U003687), 2016-2018 рр, здобувач приймав участь у виконання розділів 1,2,7. Основні результати також отримані та впроваджені при виконанні робіт на замовлення підприємства АТ «Мотор-Січ» та ДП ЗМКБ «Прогрес» ім Академіка Івченка О.Г., де здобувач був виконавцем.

### **Апробація результатів дисертації**

Основні результати дисертації доповідалися та обговорювалися на: Міжнародній науково-практичній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» 2015-2020 (Київ, Херсон); ІІХ, ІХ МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», 2017, 2018 (Київ-Херсон); ІV МНТК «Машини і пластична деформація металу», 2018

(Кам'янське). В повному обсязі робота доповідалась та була схвалена на ХХ МНТК «Прогресивна техніка та технологія» (м. Херсон, 2019) та на кафедрі Технології авіаційних двигунів Національного університету «Запорізька політехніка» в жовтні 2020 року.

### **Публікації**

За результатами досліджень опубліковано 37 робіт, з них 2 розділи монографії, 12 статей у фахових виданнях (з яких 11 в українських виданнях, що входять до наукометричних баз даних та одна стаття у періодичних наукових виданнях іншої держави, які входять до Scopus), 4 патенти України на корисну модель, 19 доповідей на конференціях.

### **Структура та обсяг роботи.**

Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Матеріал представлений на 216 сторінках машинописного тексту, у тому числі 212 сторінок основного тексту, 113 малюнків, 13 таблиць, список використаних джерел з 191 найменувань та 2 додатків на 4 сторінках.

## **Розділ 1. Аналітичний огляд**

### **1.1. Дослідження в області конструкції і технології виготовлення порожнистої широкохордної лопатки вентиляторів для турбореактивних двоконтурних двигунів**

Сучасний шлях створення конкурентоспроможних економічних ГТД для літаків цивільної та транспортної авіації передбачає розробку, створення і експлуатацію двигунів з діаметрами вентиляторів, що перевищують два метри, високим рівнем тяги, ваговими, габаритними і експлуатаційними досконаlostями, зменшеною номенклатурою деталей при одночасному забезпеченні великого ресурсу, підвищеної надійності і економічності [124-126].

Ефективним вирішенням актуальних для двигунобудування завдань є створення сімейства широкохордних лопаток вентиляторів турбореактивних двохконтурних двигунів (ТРДД) із застосуванням нових матеріалів і технологій, що включають оригінальні конструкторсько-технологічні рішення. В даний час завдяки використанню широкохордних лопаток в вентиляторах ТРДД підвищується ступінь стиснення на одній ступені при одночасному підвищенні аеродинамічній стійкості і стійкості до вібрацій. Підвищення газодинамічної ефективності при застосуванні лопаток такої конструкції дає можливість помітно зменшити загальне число лопаток в вентиляторі [119-121].

Відмова від антивібраційних полиць і використання порожнистих металевих конструкцій (Rolls-Royce, Pratt-Whitney, General Electric), титанових сплавів і композиційних матеріалів на полімерній основі в лопатках вентилятора ТРДД дозволяють полегшити лопатки і всю ступінь в цілому, знизити швидкості колові для зменшення рівня шуму.

Аналіз показує, що відмова тільки від антивібраційних полиць сприяє: підвищенню газодинамічної ефективності вентилятора до 6%; зниження питомих витрат палива, наприклад, на крейсерських режимах на 4%; збільшення витрат повітря через вентилятор.

Вказана обставина виявляється надзвичайно важливою, так як, повітряний потік, який проходить по зовнішньому контуру, створює близько 75% загальної

тяги двигуна. Тому при заданій площі прохідного перерізу використання широкохордної лопатки без антивібраційних полиць надає великі можливості щодо підвищення, вибору і оптимізації тяги. Досвід зарубіжних двигунобудівних компаній показав, що широкохордні лопатки мають велику жорсткість при згині, ніж лопатки з великим подовженням і антивібраційними полками. А пружний потенціал поглинання енергії при ударі веде до підвищення ударостійкості лопатки і колеса при попаданні в тракт двигуна сторонніх предметів і живучості лопаток при їх пошкодженні. Практично зникає питання утримання зруйнованої лопатки корпусом вентилятора.

Створення технології виготовлення порожнистих титанових лопаток вентиляторів є одним з великих досягнень останньої чверті XX століття в двигунобудування [137].

Провідні світові виробники авіаційних двигунів, такі як "Rolls-Royce" та інші зуміли створити й експлуатувати двигуни, вентилятори яких оснащені полегшеними широкохордними лопатками власної розробки. Але у кожній фірми технологія виготовлення такої лопатки має свої принципові відмінності.

Найбільший досвід у створенні та експлуатації порожнистих титанових широкохордних лопаток накопичено на фірмі Rolls-Royce. За даними роботи [1] фірма приступила до розробки технології виготовлення порожнистих широкохордних лопаток вентилятора для сімейства двигунів RB.211. Ці розробки виявилися необхідними в зв'язку з невдачами використання фірмою Rolls-Royce лопаток з вуглепластика. Фірмою Rolls-Royce розглядалися варіанти створення полегшених порожнистих лопаток з вуглепластика. Але, при подальшій експлуатації цих лопаток їх периферійний переріз в умовах підвищеної вологості і температури розшарувалося. Також досягти потрібної товщини за допомогою композитів непросто, тому що потрібно багато шарів. Крім того, деталям з композитних матеріалів важче надавати складну тривимірну форму. В результаті фірма була змушена замінити вуглепластикові лопатки на титанові [71,74].

Була розроблена і впроваджена у виробництво оригінальна технологія виготовлення порожнистих титанових широкохордних лопаток вентиляторів з титановим сотовим наповнювачем [2]. Вона була заснована на технології дифузійного з'єднання і штампування методом надпластичної ізотермічної деформації, а також оптимізації властивостей пластин - заготовок з титанових сплавів.

При виробництві порожнистих вентиляторних лопаток зі стільниковим заповнювачем, застосовувалася рідкофазне дифузійне зварювання [2]. Лопатки виготовляли у вигляді багатошарової конструкції, що складається з внутрішнього комірчастого наповнювача і зовнішніх оболонок з титанового сплаву. Зовнішні панелі виготовляли з плоских гарячекатаних титанових (Ti-6Al-4V) пластин. Під час складання двох зовнішніх панелей на внутрішні поверхні попередньо наноситься проміжний шар для проведення зварювання.

Подальша механічна обробка та оздоблення поверхонь лопатки після зварювання завершує процес виготовлення. Всі ключові етапи технологічного процесу виконувалися і контролювалися автоматично.

В експлуатації лопатки вентиляторів мали втомні руйнування, при цьому одна з лопаток зруйнувалася від втоми з профільної частини поблизу хвостовика.

Тому контроль лопаток в експлуатації у сімейства двигунів RB.211-535E4 проводять через певну кількість циклів для кожного виду двигунів.

Порожністі лопатки другого покоління є тришарові конструкції з гофрованим наповнювачем, який найбільш ефективно сприймає аеродинамічні навантаження. Для цього компанія застосовує, унікальну, на її погляд, технологію надпластичного формування. Лопатки виготовляються з "сендвіча", що складається з трьох листів титану: спершу їх пов'язують між собою за допомогою точкової дифузії, а потім нагрівають і додають майбутньої лопатці тривимірну форму.

При виготовленні багатошарових конструкцій з використанням попереднього зварювання плавленням для з'єднання листів наповнювача застосовують контактне шовне або точкове [3], електронно-променеве [4] і

лазерне зварювання, а в деяких випадках використовують зварювання тиском. В результаті отримують багат шарові пористі конструкції. Подібні технології дозволили Rolls-Royce виробляти міцні лопатки вентилятора з високим ресурсом.

Застосовувана програма автоматизованого управління технологічними операціями, а також жорсткі вимоги до підтримки геометричної форми штамп, в цілому, забезпечують отримання заданих допусків на розміри, розподіл температур і швидкості деформації, необхідні для виготовлення лопатки необхідної якості. Цикл виготовлення завершується селективною механічною обробкою на верстатах з ЧПУ і операціями по обробці поверхонь.

Порожнисті лопатки третього покоління виготовляються з шаблевидної формою вхідної кромки, що забезпечує ефективну роботу двигуна на високих оборотах і зниження шуму двигунів. При цьому робоча лопатка вентилятора - порожниста конструкція з титанового сплаву. У середині лопатки знаходиться гофрований листовий наповнювач. Цей наповнювач утворює ребра жорсткості, з'єднаних зварюванням тиском з обшивками з боку корита спинки. І корито і спинка змінної товщини по висоті [56-59].

Таким чином, широкохордні порожнисті титанові лопатки вентилятора, розроблені компанією Rolls-Royce, встановили нові стандарти в області аеродинамічної ефективності і стійкості до пошкоджень.

Фірма Pratt-Whitney застосувала і продовжує застосовувати порожнисті титанові лопатки вентилятора, в яких відсутні полочки, в двигунах PW4048 [1].

Зменшивши радіус втулки на вході, зберігши при цьому радіус на виході без надмірного кута підйому проточної частини і пов'язаних з цим втрат, фахівцям вдалося отримати більші витрати повітря на 4,7% при тому ж зовнішньому діаметрі [5].

Взагалі відомості про технологічний процес виготовлення широкохордних лопаток в двигунах дуже скупі.

Відомо, що спочатку дві плоскі заготовки піддають механічній обробці, що дає можливість створити порожнини і поверхні з'єднання в формі ребер



жорсткості, кромки і хвостової частини, за якими здійснюється дифузійне зварювання «у площині» по повністю контрольованій технології. А дифузійне з'єднання здійснюється на молекулярному рівні. [60-62].

На другому етапі здійснюють нагрівання заготовки до стану надпластичності і надають плоским заготовкам форми профілю незакрученої лопатки. Остаточну форму лопатці надають в закритому штампі.

Після чого здійснюють закрутку з наступним калібруванням і допрацьовують вхідну і вихідну кромки фінішною механічною обробкою.

За наявними відомостями в лопатках вентилятора двигуна PW4084 спостерігається зниження якості як зварювальних поверхонь, так і структури матеріалу. За наявними відомостями в лопатках при механічній обробці можуть створюватися концентратори напружень, що сприяє утворенню втомних тріщин.

Проте, фірма Pratt-Whitney не використала розроблену конструкцію і технологію виробництва порожнистих широкохордних лопаток з меншим діаметром вентилятора двигуна PW6000.

Фірма General Electric здійснювала роботи з порожнистим лопаток компресора з титанового сплаву Ti-6Al-4V [3, 6-7]. Але в зв'язку з малою ефективністю впровадження технології порожнистих титанових лопаток з великим подовженням і з високою вартістю цих робіт зазначений напрямок на фірмі General Electric не отримало належного розвитку. Компанія General Electric цілком покладається на лопатки з волокнистого вуглепластика, які вперше були представлені на двигунах GE90.

Досвід, накопичений при розробці полегшених лопаток з вуглепластика, був широко використаний при створенні широкохордної лопатки вентилятора двигуна GE90 з композиційних матеріалів. Але, відносно низька стійкість лопаток вентиляторів з композиційних матеріалів до ударних навантажень при попаданні в тракт двигуна сторонніх предметів, наприклад, птахів, вимагала нових рішень [63-65].

Ця проблема була вирішена шляхом використання передньої кромки лопатки, яка зміцнена титановим сплавом. Для підвищення стійкості лопаток до

ударних навантажень і при попаданні птахів передня кромка має захисну титанову оболонку товщиною 0,254 мм. Для запобігання розшаровування задніх кромок застосовується зшивання кевларовою ниткою «поперечним стібком» (cross stitching). За даними компанії General Electric, в процесі доведення товщина титанової оболонки на передній кромці була збільшена, а вихідна кромка і торець лопатки також були захищені титановою оболонкою [66-67].

Серед перших робіт на пострадянському просторі необхідно назвати порожнисту лопатку вентилятора, створену в СНТК ім. Н.Д. Кузнецова. Роботи зі створення порожнистих титанових конструкцій, отриманих методами дифузійного зварювання і надпластичного формування, були виконані в МНВП «Мотор» спільно з Інститутом надпластичності АН СРСР. В цілому, роботи за цими напрямками проводили конструкторські бюро, керовані Н.Д. Кузнецовим, А.М. Люлькою і ін.

Фахівцями цих конструкторських бюро були проведені перші роботи по розробці конструкції порожнистих вентиляторних лопаток і створення методів дифузійної зварювання. Були проведені дослідження міцності, в тому числі втомної, пластин, отриманих дифузійної зварюванням. Технологія до теперішнього часу є предметом численних патентів, аналіз яких виконаний в Центральному інституті авіаційного моторобудування ім. П.І. Баранова (ЦІАМ).

В ході спільних робіт ЦІАМ і Всеросійського науково-дослідного інституту авіаційних матеріалів (ВІАМ), ВАТ "Авіадвигун" з урахуванням потреб в авіаційному двигунобудування, була розроблена складова конструкція широкохордної лопатки вентилятора. Спільними зусиллями ВАТ "ОДК", ВАТ «Авіадвигун», ІПСМ РАН, ПАТ "Корпорація ВСМПО-АВІСМА", ВАТ "УМПО" була розроблена пробна технологія виготовлення порожнистих широкохордних лопаток вентилятора. За цією технологією була виготовлена пробна партія широкохордних вентиляторних лопаток для першого двигуна-демонстратора ПД-14 [128-133].

Розроблена лопатка являє собою порожнисту конструкцію, що складається з титанової оболонки, яку підсилили несучими стрижнями з високомодульного

боралюмінієвого металлокompозиційного матеріалу (МКМ). Тим самим, подібна конструкція виявилася в 1,5-2,0 рази легше монолітної титанової лопатки і на 25% жорсткішою. Крім того, застосування такої широкохордної лопатки дозволяє скоротити число ступенів вентилятора.

Надалі, таку лопатку можна вдосконалити шляхом зміни наступних параметрів: кількістю несучих навантажених поздовжніх стрижнів і їх геометричні розміри, місця розташування і т.п., що, в свою чергу, дозволяє управляти рівнем власних частот з метою зниження величини змінних напружень, що виникають при резонансних коливаннях, і відбудови від небезпечних коливань.

Крім того, раціональними є відмова від бандажування лопаток через високу жорсткість і високі демпфуючі характеристики композиційного матеріалу, мінімізація переміщень периферійної частини і, отже, робочих зазорів, а також зниження маси диска і всієї ступені в цілому. В результаті перерахованого вище можна очікувати, що використання такої конструкції дозволить збільшити ресурс лопатки на 50% і підвищити ККД двигуна, його екологічність.

Однак ідея реалізації составної порожнистої лопатки із застосуванням композиційних матеріалів на металевій матриці представляється досить складною. На сьогоднішній час дані про створення лопатки такій конфігурації в відкритій пресі відсутні. Процес відпрацювання технології виготовлення лопаток составної конструкції дійсно є складним.

ВІАМ у співпраці з ЦІАМ поетапно вирішує складні завдання по створенню принципово нової конструкції і технології в двигунобудування. Наприклад, досліджений метод пайки і дифузійного зварювання на етапі з'єднання титану з боралюмінієвим МКМ. Однак даний метод виявився малоефективним через складнощі, що виникають при нанесенні припою на поверхню матеріалу і високою вартістю використовуваних компонентів.

В даний час розробляється досвідчена технологія виготовлення модельної порожнистої лопатки составної конструкції [76]. За основу розробленої конструкції взята конструкція титанової суцільний лопатки.

Проведені в останні десятиліття дослідження показують, що високу ефективність при виготовленні порожнистих конструкцій забезпечує технологічний процес, заснований на поєднанні надпластичного формування зі зварюванням тиском (НПФ / ЗТ). Дана технологія найбільш перспективна, оскільки забезпечує гнучкість проектування і виготовлення складних конструкцій з економією по масі до 30% при зниженні вартості виготовлення на 50% [8]. Щоб відповідати всім вимогам по рівню аеродинамічних характеристик, по загальній масі, допустимого рівня шуму конструктори двигунів збільшують діаметр вентилятора для збільшення витрати повітря через вентилятор. Збільшення діаметра вентилятора і відповідне цьому подовження лопаток призведе до збільшення маси лопаток, що в свою чергу впливає на збільшення маси роторних і статорних деталей. Тому полегшена лопатка вентилятора є ключовим елементом конструкції двигуна нового покоління, що дозволяє знизити загальну масу двигуна [8]. Метод НПФ дозволяє отримати легку і, одночасно, жорстку порожнисту конструкцію складної конфігурації з надпластичного титанового сплаву ВТ6 [75].

Однак зберігається серйозна економічна проблема, пов'язана з високою собівартістю виготовлення зазначеної продукції із-за високої трудомісткості. Проблема посилюється тим, що дороге штампове оснащення при температурі  $T = 927^{\circ}\text{C}$  має низьку стійкістю [9].

На думку ряду дослідників, одним з кардинальних шляхів при створенні економічно привабливих технологій НПФ може бути зниження температури НП оброблюваного сплаву. Так, за словами авторів [10-12] зниження температури НП до  $T = 760^{\circ}\text{C}$  - може зробити технологічний процес НПФ титанових сплавів економічно ефективним.

У даній роботі показана можливість вдосконалення процесу НПФ порожнистих лопаток вентилятора з титанового сплаву ВТ6 за рахунок низькотемпературної СП [77].

Дослідження проводилися на зразках у вигляді прутка діаметром 70 мм і листа товщиною 0,8 мм стандартного по ГОСТ 19807-91 хімічного складу, який є аналогом зарубіжного сплаву Ti-6Al-4V.

В результаті попереднього загартування мірних заготовок з гарячекатаного прутка діаметром 70 мм при температурі  $T = 1000^{\circ}\text{C}$  шляхом охолодження в холодній воді і подальшому всебічному ізотермічному куванні починаючи з температури  $T = 550^{\circ}\text{C}$  зі зниженням температури на наступних етапах до  $T = 650^{\circ}\text{C}$  була отримана листова заготівля сплаву ВТ6 ультрадрібнозернистої структури із середнім розміром зерен  $d = 0,2\text{мкм}$  за методикою, докладно викладеної в [13; 14].

Після всебічного кування відбувалось осаджування напівфабрикату до товщини 15 мм, потім після фрезерування для додання плоскопаралельної форми прокочували на дослідному стані ЛИС-6/200 в ізотермічних умовах при температурі  $T = 550^{\circ}\text{C}$  для отримання листів товщиною 0,8-0,9 мм.

Робочі валки прокатного стану нагрівали до температури  $T = 550^{\circ}\text{C}$ . Швидкість деформації варіювали в межах  $\dot{\varepsilon} = 10^{-2} - 10^{-3} \text{с}^{-1}$  [15].

Після проведення технологічних операцій з отриманих листових заготовок у вакуумній печі ОКБ80-86 при різних температурах від  $T = 550^{\circ}\text{C}$  і до  $T = 550^{\circ}\text{C}$  методом НПФ виготовили ряд порожнистих модельних конструкцій: півсфери радіусом 35 мм, циліндричні оболонки діаметром 70 мм, а також плоскі зразки порожнистих лопаток [9-12].

Таким чином, для титанових сплавів типу ВТ6 характерно характерне зниження температури НП зі зменшенням розміру зерен до нано і субмікронних величин [14; 15].

Характерні ознаки НП дослідники спостерігали при мінімальній температурі  $T = 550^{\circ}\text{C}$  [8].

Механічні випробування зразків на розтягання показали, що починаючи з температури  $T = 600^{\circ}\text{C}$  досліджуваний сплав ВТ6 із середнім розміром зерен  $d = 0,2\text{ мкм}$  має подовження більше  $\delta = 600\%$  фактично без утворення шийки, що істотно перевищує значення необхідної технологічної деформації при виготовленні методом НПФ більшості виробів, наприклад, порожнистих лопаток за один перехід [16].

З результатів механічних випробувань на розтяг слід дуже важливий для практики висновок про наявність високого потенціалу технологічної пластичності у досліджуваного сплаву ВТ6 в умовах низькотемпературної НП, який може бути успішно реалізований в технології виготовлення порожнистих виробів складної конфігурації методом НПФ при знижених температурах починаючи з  $T = 600^{\circ}\text{C}$ .

Крім того, при розробці процесів формоутворення має зберігатися вихідна якість матеріалу в виготовленому виробі.

Проведені в даній роботі [17], а також в [18], електронно-мікроскопічні дослідження зразків після розтягування до ступеня деформації порядку  $\delta = 600\%$  і «циліндричних оболонок» після НПФ при температурі  $T = 600^{\circ}\text{C}$  не дозволили виявити навіть поодиноких пор в сплаві ВТ6. Цей результат є важливим для промислового використання методу НПФ при виготовленні порожнистих конструкцій з ультродрібною структурою титанових листів.

Про високу технологічність методу НПФ при знижених температурах для виготовлення точних заготовок порожнистих виробів свідчать зразки таких заготовок різної конфігурації з титанового сплаву ВТ6, виготовлені в умовах низькотемпературної НП при температурах  $T = 600^{\circ}\text{C}$ ;  $650^{\circ}\text{C}$  і  $750^{\circ}\text{C}$ .

Слід зазначити відмінну рису низькотемпературного НП сплаву ВТ6, що представляє підвищений рівень значень напруження течії при порівнянні з традиційною НП, наприклад, при  $T = 900^{\circ}\text{C}$  [14].

Однак, при високих температурах, після НПФ, на поверхні виробів утворюється деформаційний рельєф, який може істотно знижувати втомну міцність матеріалу в умовах знакозмінних навантажень [19]. При виготовленні

порожнистих виробів з замкнутими порожнинами механічно усунути шорсткість внутрішніх поверхонь після НПФ не вдається через трудомісткість або неможливості їх обробки. Прикладом таких конструкцій є титанова лопатка вентилятора авіаційного двигуна [20].

Згідно з дослідженнями в роботі [19] при низькотемпературної НПФ шорсткість поверхні можна істотно знизити за показниками Ra або Rz. Наприклад, при зниженні температури НПФ з  $T = 900^{\circ}\text{C}$  до  $T = 700^{\circ}\text{C}$  параметр шорсткості Ra можливо зменшити з 1,3 мкм до 0,6 мкм, тобто більш, ніж в 2 рази.

Визначальним же обставиною використання НП в технології, поряд з формоутворенням, є необхідність забезпечення високих механічних властивостей матеріалу самого виробу. Згідно науково-технічним джерелом вплив низькотемпературної НП на механічні властивості титанових сплавів дуже обмежена. Матеріал порожнистої лопатки, виготовленої в умовах низькотемпературної НП, володіє підвищеним комплексом механічних властивостей, який не досягається в аналогічних порожнистих лопатках зі сплаву ВТ6, виготовлених за режимами традиційної СП при  $T = 900^{\circ}\text{C}$ .

В роботі [21] представлений передовий міжнародний досвід виготовлення багатошарових порожнистих конструкцій за технологією, яка поєднувала надпластичне формоутворення зі зварюванням тиском (НПФ / ЗТ). Описано технологічні схеми і особливості даної технології. Представлені основні типи конструкцій, що виготовляються провідними закордонними фірмами, які знаходять застосування в авіакосмічній техніці.

Незважаючи на те, що багатошарові конструкції мають меншу вагу, ніж еквівалентні по жорсткості гладкі оболонки і оболонки з підкріплювальними ребрами, проте знижена технологічності є їхнім спільним недоліком.

Проведені в останні десятиліття дослідження показують, що високу ефективність при виготовленні багатошарових конструкцій може забезпечити технологічний процес, заснований на поєднанні надпластичного формування зі зварюванням тиском (НПФ / ЗТ).

Такі багатошарові конструкції, виготовлені методом НПФ / ЗТ, є тонкостінні оболонки, поділені виготовленими заодно з ними перегородками на безліч порожніх осередків. Такі конструкції називають комірчастими. Завдяки методу НПФ / СД можна отримувати жорсткі тонкостінні конструкції складного профілю з високим коефіцієнтом використання матеріалу при відносно низьких енергетичних і капітальних витратах.

У виробництві елементів конструкцій методом НПФ / ЗТ найбільш широкого поширення набули титанові сплави, так як з'являється можливість отримати переваги, створювані незвичайними особливостями титанових сплавів - схильністю до надпластичності і зварюваністю в твердому стані.

В роботі [21] викладено основи дифузійного зварювання стосовно інтегральним процесам НПФ / ЗТ. Конструкції, одержувані методом НПФ / ЗТ, поділяють за кількістю використовуваних листів на двох, трьох і чотирьох листові.

Найбільше застосування при виготовленні деталей двигунів, які використовуються в авіакосмічній промисловості, знаходять тришарові гофровані панелі і чотирьохшарові пористі конструкції.

Одним із способів при виготовленні багатошарових конструкцій є спосіб, заснований на використанні противозварних покриттів [21]; другий базується на використанні попереднього зварювання плавленням [21].

За першим способом зварюванням в твердому стані з'єднують тільки певні ділянки листових заготовок, а решта поверхні, завдяки нанесеному на них захисного покриття, при цьому не з'єднуються. Після чого отриману заготовку деформують в умовах надпластичності і надають конструкції складну форму (3-х листові конструкції). Противозварним покриттям може служити нітрид бору BN або окис ітрію  $Y_2O_3$ .

Недоліком даного способу виготовлення таких конструкцій є участь обшивок в створенні геометричної форми наповнювача, що призводить до утворення на них утяжин.



Прикладом використання порожніх конструкцій, виготовлених за технологією НПФ / ЗТ, є широкохордна порожниста лопатка вентилятора, що виготовляється з титанового сплаву Ti-6Al-4V.

## 1.2. Зварювання тиском

Зварювання тиском - зварювання із застосуванням тиску, що здійснюється за рахунок пластичної деформації зварювальних частин при температурі нижче температури плавлення. Дифузійне зварювання - зварювання тиском, що здійснюється за рахунок взаємної дифузії атомів в тонких поверхневих шарах контактуючих частин. Дифузійне зварювання здійснюється при відносно тривалому впливі підвищеної температури і незначній пластичній деформації.

Дифузійне зварювання - це процес з'єднання однорідних і різнорідних металів, сплавів і неметалічних матеріалів, здійснюваний шляхом дифузії атомів через поверхню стику, що виникає в результаті дії тиску і нагрівання протягом заданого часу. У розвиток теорії і практики дифузійної зварювання внесли вчені М.Х. Шоршоров, Л.Н. Красулин, Е.С. Каракозов, Г.В. Конюшков, І.І. Метьюлкін і ін. [22].

Для дифузійної зварювання характерно отримання нероз'ємного з'єднання в твердому стані, що формується внаслідок виникнення зв'язків на атомному рівні, що з'являються в результаті зближення контактних поверхонь в результаті локальної пластичної деформації при підвищеній температурі, що забезпечує взаємну дифузію в поверхневих шарах матеріалів, що з'єднуються [23, 24].

М.Х. Шоршоров процес зварювання під тиском поділяв на дві стадії, які включають формування фізичного контакту супроводом зминання мікронерівностей на з'єднуються поверхнях і утворенням несучільностей. Даний процес ілюструють кінетичними кривими [25].

Стадія А відповідає першому етапу зварювання під тиском, при якому здійснюється пластична деформація, що з'єднуються, зближення атомів речовини. Стадія Б, В є другим етапом зварювання, на якому спостерігається зміщення атомів, хімічну взаємодію сприяють освіти міцного з'єднання. На стадії

В можуть протікати процеси релаксаційного характеру, що є небажаним, оскільки призводить до зниження міцності з'єднань.

Кінетичні криві різних речовин відрізняються тривалістю і характером протікання етапів. Поділ процесу ЗТ є умовним, так як залежить від фізико-хімічних властивостей матеріалів, що з'єднуються.

М.Х Шоршоров відзначає два параметра зварювання в твердому стані: тиск, і температура. При певній величині прикладеного тиску і відповідної температури, здійснюється пластична деформація і активація контактних поверхонь в зоні з'єднання [26, 27].

Методика розрахунку параметрів дифузійної зварювання титану ґрунтується на утворенні фізичного контакту в результаті згладжування мікронерівностей. Розглядалося два варіанти фізичного контакту в залежності від форми мікронерівностей [28, 29].

Якщо мікровиступів у вигляді конуса, приймається, що згладжування мікровиступів відбувається під дією напружень. Швидкість згладжування визначають зі співвідношення:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{l_{\kappa} - l_0}{l_{\kappa}} \cdot \frac{1}{t} \quad (1.1)$$

де  $l_{\kappa}$  – сума двох довжин утворює конуса;  $l_0$  – довжина підстави мікровиступів;  $t$  – тривалість згладжування.

Якщо форма мікровиступів у вигляді параболи, яка тим ближче до прямокутника, чим вище чистота обробки, то згладжування мікровиступів за рахунок процесу опади виступу на величину, меншу половини його висоти.

Була розроблена математична модель для розрахунку початкової стадії утворення з'єднання - освіти фізичного контакту на основі деформації мікрорельєфу поверхні під дією зварювального тиску [30]. Критерієм опірності матеріалу пластичної деформації при зварюванні тиском служила швидкість повзучості. Для підвищення швидкості повзучості необхідно підвищувати тиск, або температуру, або зменшувати структуру до нанозерен.

Найбільші збіг розрахункових і експериментальних даних спостерігається при зварюванні однорідних або близьких за значеннями пластичних властивостей металів. Застосування цієї математичної моделі для розрахунку освіти фізичного контакту металів і неметалів неможливо [3].

Дана методика розрахунків ЗТ не враховує теорію активації контактних поверхонь. Згідно з якою, розвиток фізичного контакту залежить від недоліків у будову кристалічного тіла (точкові дефекти, дислокації, зерна). Автор у своїй роботі розглядає тільки мікродифект дислокацію, яка є механізмом пластичної деформації. Повищення температури сприяє рухливості точкових дефектів, які активно беруть участь в процесах взаємної дифузії в поверхонь, що з'єднуються.

У процесі зварювання тиском між поверхнями може відбуватися хімічна взаємодія, що називають схоплювання. Теорія освіти схоплювання заснована на активних центрах, в якості яких виступають поверхневі дефекти у вигляді виходу дислокацій, домішкових атомів. В активних центрах відбувається розрив старих валентних зв'язків і встановлення нових між поверхневими атомами, що з'єднуються. Схоплювання можна вважати завершальною стадією процесу зварювання в твердому стані, оскільки це фізичний контакт поверхневий, що передуює об'ємному взаємодії [32].

Процес схоплювання є достатнім для утворення зварного з'єднання, яке не володіє високою в'язкістю і пластичністю.

Об'ємне взаємодія між матеріалами призводить до усунення фізичних і хімічних недосконалостей в будові металу в зоні стику, утворення спільних зерен в контакті, призводить до усунення неоднорідності і зниження внутрішніх напружень.

Відповідно до джерела [33] В.А. Бачин розділяє на наступні етапи зварювання під тиском. Перший етап процес схоплювання атомів контактних поверхонь по всій площі з'єднання. Другий етап - контактування поверхонь при постійній температурі вище. На третьому етапі - охолодження зони з'єднання після зварювання до температури нижче або рівній. Другий і третій етап об'єднує

в один - інкубаційний період протягом якого утворюється термодинамічний стійкий зародок нової фази.

В процесі ЗТ самим невизначеним етапом є проміжок часу утворення стійкого зародка нової фази.

Дефекти в кристалічній структурі визначають механізм і швидкість дифузії. Для дифузії в металах і неметалевих матеріалах, коли процеси протікають при досить високих температурах ( $0,8 - 0,9T_{nl}$ ), основне значення мають точкові дефекти в кристалах. При більш низьких температурах ( $0,6 - 0,8T_{nl}$ ) зростає роль дифузії по дислокаціям, границь зерен і іншими протяжним дефектів. Границі зерен (поверхневі дефекти) є областями підвищеної дифузійної рухливості атомів. чим дрібніше зерно, тобто чим більше протяжність кордонів в обсязі матеріалу, тим помітніше аномалія дифузії по границях зерен.

Процес розвитку фізичного контакту залежить від ряду факторів: стан контактуючих поверхонь, властивостей матеріалу, умов термдеформаційного впливу.

ЗТ застосовують для виготовлення складних виробів з листових титанових сплавів в поєднанні зі НПФ. Особливістю даного процесу в тому, що ЗТ і НПФ необхідно проводити в одному температурному інтервалі. Це можливо так, як механізми протікання даних процесів тісно пов'язані і технологічні параметри їх однаково залежать від розміру зерна.

Розміщення між заготовками в зоні з'єднання проміжної прокладки і з початковим розміром зерен менше 1 мкм, що призводить зниження накопичення залишкових деформацій в зоні з'єднання дифузійної зварювання.

Основними дефектами, які виникають при дифузійному зварюванні: непровари, тріщини, нові фази, високі залишкові напруги, велика залишкова деформація [21].

Непровари - дефект розкриття від десятих часток мікрометра до десятків мікрометрів, в напрямку перпендикулярному до поверхні з'єднань. Непровар

може бути заповнений проникли в нього повітрям, інертним газом, оксидами або забрудненнями. Для непроварів характерно неуважність по площі з'єднання і відсутність виходу на зовнішню поверхню зварного з'єднання. Зустрічаються строчечного або переривчасті непровари, які на мікрошліф мають вигляд переривчастої лінії, що йде уздовж поверхні стику або у вигляді скоплень непроварів у вигляді сітки. Причинами непроварів можуть бути неякісна підготовка поверхонь, що зварюються, порушення режимів зварювання (недостатня температура нагріву, що стискають зусилля, час зварювання, порушення складу газового середовища зварювальної камери) [24].

При дифузійному зварюванні може утворюватися три основні мікроструктури в зоні з'єднання: перша - з двома кордонами розділу зони з'єднання, структура між цими межами відрізняється ліній розділу шириною до одного мікрметра або соізмерімјq з межами зерна; другий - з лінією контакту між з'єднаннями матеріалами, в зоні контакту з'являються ділянки з рекристалізацією, ширина якої відповідає межам зерен, спостерігається рядок непроварів розкриттям 1-2 мкм і діаметром до 15 мкм; третій - з повним зникненням кордону розділу, розміри непроварів менше розмірів зерен.

Непровари істотно знижують міцність і втомні характеристики зварних з'єднань і динамічну міцність. Непровари можуть стати зародками тріщин, що розвиваються при додатку навантаження [92].

При зварюванні титаном і його сплавів можуть спостерігатися дефекти, що представляють собою пори або залишки оксидної або жирової плівки, які орієнтовані вздовж вихідної кордону розділу. Виникають через недостатньо хороше очищення поверхонь, що з'єднуються перед зварюванням [93].

До дефектів відноситься значна зміна структури матеріалів зони з'єднання в порівнянні з вихідними металами. При зварювання титан-титан спостерігається укрупнення зерен [94].

Дефект оплавлення виникає при нагріванні до температури близької до температури плавлення зварюваних деталей. Дефект зміщення виникає через

неправильну конструкції складального пристосування або неточної установки деталей, що зварюються [95].

Для виявлення дефектів і причин їх виникнення в зварювальному з'єднанні необхідно здійснювати контроль на всіх етапах, починаючи від надходження на зварювання матеріалів і закінчуючи випуском готового зварного виробу. Дуже важлива якість матеріалів. Недотримання геометричних розмірів деталей, що зварюються може привести до появи в зварному з'єднанні недопустимих дефектів. Порушення плоскопаралельності навантажуються і зварювальних поверхонь призводить до нерівномірності розподілу тиску. Збільшення мікронерівностей призводить до зниження міцності дифузійного з'єднання. Обробка поверхні багатьох металів і їх сплавів з достатня для отримання міцного зварного з'єднання, при більш грубій обробці міцність зварного з'єднання істотно знижується [19].

Необхідно враховувати, що при зварюванні деталей, що мають значно більші розміри в порівнянні з контрольними зразками, можливі нерівномірність нагріву уздовж поверхні з'єднання і нерівномірність передачі тиску. Зразки та вироби не забезпечують ідентичності умов формування з'єднання [32].

Перед руйнують випробуваннями зразків доцільно проводити неруйнівний контроль зварного з'єднання. Механічні випробування на розтяг, вигин, на ударну в'язкість проводять для контролю якості з'єднань, оптимізації режимів дифузійного зварювання. Для визначення справжнього значення міцності дифузійного зв'язок через загальні зразках по зоні стику робиться кільцевої або поперечний надріз. Руйнування зразків відбувається по стику або перехідній зоні. Реальна міцність з'єднання визначається за допомогою коефіцієнта, що враховує форму надрізу. Для оцінки якості з'єднання результати випробувань порівнюють з аналогічними характеристиками основного матеріалу [96, 97, 98].

Високотемпературним випробуванням піддають зварні вузли авіаційної і ракетно - космічної техніки, що працюють при підвищених температурах.

На вибір методу контролю якості готового сполуки впливають такі чинники: вид конструкції зварного виробу, матеріали деталей, що з'єднуються,

експлуатаційні вимоги до з'єднання і виробу, характер дефектів зварного з'єднання [36].

Методи просвічування зварних з'єднань рентгенівським і гамма - випромінюванням, широко вживаними для контролю з'єднань, отриманих зварюванням плавленням, непридатні для виявлення характерних дефектів, що виникають при дифузійному зварюванні і мають мале розкриття [99-114].

Виявити такі дефекти можна методами ультразвукового контролю. До методів ультразвукового контролю відносять тіньовий метод, дзеркально - тіньовий метод, ехометод або поєднання ехометоду і дзеркально - тіньового - ехотіньовий метод. Хорошу перспективу представляє застосування ультразвукових спектральних методів контролю, які дозволяють значно розширити чутливість і достовірність виявлення дефектів [37].

Для контролю готових виробів можна застосовувати капілярний, електроіндуктивний і метод магнітного порошку [99].

Використання тільки одного методу контролю недостатньо. Доцільно застосування комплексного методу контролю, при якому окремі методи доповнюють один одного.

Одним з перспективних методів неруйнівного контролю зварних з'єднань тонкостінних конструкцій є метод акустичної емісії, голографічна дефектоскопія і магнітографічний метод.

Технологічні особливості дифузійної зварювання полягає в декількох етапах. На першому етапі готується поверхню з'єднання під зварювання, яка включає в себе очищення, знежирення, механічну обробку і застосування проміжних матеріалів [100].

При підготовці поверхні металу під зварювання необхідно врахувати, що після обробки металу різанням поверхню лише малі частки секунди залишається чистою. При цьому необхідною і достатньою обробкою поверхні металів під ЗТ може бути механічна зачистка і знежирення поверхні органічними розчинниками. Найбільш ефективний спосіб очищення є іонна бомбардування,

термообробка в вакуумі або ультразвукова обробка, яка проводиться перед зіткненням поверхонь, що з'єднуються [40].

Як проміжних матеріалів або прокладок використовують більш пластичні матеріали в порівнянні з основними, які зварюються. Раціонально, як прокладки використовувати основний матеріал, але з меншим зерном.

Другий технологічною особливістю дифузійної зварювання є забезпечення по всій контактній поверхні сталість температури і стиснення. При отриманні з'єднання дифузійної зварюванням провести комплексний аналіз якості з'єднання на наявності дефектів, що є третиною особливістю технологічного процесу дифузійного зварювання [41].

Основними параметрами ЗТ є чистота поверхні, величина шорсткості, зварювальне середовище, температура, тиску стиснення поверхонь, тривалість зварювання.

Оптимальні значення температури ЗТ зазвичай знаходяться в інтервалі  $0,7 - 0,8T_{пл}$ , а тиску стиснення поблизу межі текучості зварюються при температурі зварювання.

Комплексний аналіз дифузійного з'єднання включає в себе візуальний огляд, ультразвуковий контроль, випробування на розтяг, ударний вигин і дослідження мікроструктури.

Відомий спосіб ЗТ титанового сплаву ОТ4-1, який складається з двох етапів. На першому етапі ЗТ здійснюється нагрів до температури  $950^{\circ}C$ , при якій відбуваються  $\alpha + \beta \rightarrow \beta$  перетворення, і витримка під тиском  $p = 2МПа$ , достатнього до освіти фізичного контакту між сполучаються поверхнями, в перебігу часу  $\tau = 20$  хвилин, яке було визначено залежністю:

$$\tau = k \cdot p^{-n} \cdot \exp(E / RT) \cdot \ln R_A \quad (1.2)$$

де  $p = 2МПа$  - чисельне значення зварювального тиску;

$E = 230000 Дж / моль$  - енергія активації;

$R = 8,3 Дж / К - моль$  - газова постійна;

$T = 1223K$  - температура нагріву;



$R_A = 10_{\text{мкм}}$  - чисельне значення шорсткості поверхонь, що зварюються.

$k$  - емпіричний коефіцієнт, що характеризує кінетику розвитку площі фізичного контакту між сполучаються поверхнями заготовок;

$n$  - емпіричний коефіцієнт, що характеризує повзучість матеріалу заготовки.

Другий етап - розвиток об'ємного взаємодії без додавання зварювального тиску при температурі  $950^{\circ}\text{C}$  протягом 40 хвилин.

В роботі [142] експериментально встановлено зварювальне тиск для титанового сплаву ВТ6 в залежності від температури. Процес ЗТ одночасно протікає з процесом зміцнення зовнішньої поверхні тонколистової конструкції товщиною 0,8 мм має ребра 2,8мм, за рахунок активної газового середовища містить азот.

Основною проблемою ЗТ є усунення дефектів і спотворення геометрії в зоні з'єднання. Існують різноманітні пропозиції поліпшення якості з'єднання при ЗТ.

Для поліпшення якості з'єднання при ЗТ зварюються поверхні піддають формоутворення пластичної деформації (обкатка роликami) для отримання високого ступеня чистоти і необхідної конфігурації поверхні [143].

Також в процесі ЗТ прикладають зусилля в двох напрямках. Одне зусилля прикладають перпендикулярно до поверхні контакту, яке сприяє протіканні пластичної деформації і процесу зварювання. Друге зусилля, в процесі ЗТ прикладають поперек з'єднання для збільшення швидкості зближення зварювальних поверхонь за рахунок зсуву мікровиступів [144].

Був запропонований спосіб нагріву зони з'єднання до температури зварювання і здавлення [114-118]. Потім деталь піддають відпал рекристалізації в умовах всебічного. стиснення при тиску не менше  $5\sigma_{0,2}$ , тривалістю 1-2 г. для заліковування несплошностей і утворення загальних зерен [145].

У способі [146] ЗТ здійснюється тиском  $p = 0,7...0,95$  границі текучості сплаву при кімнатній температурі, нагрів проводять до температури на 20 ...

100<sup>0</sup>С вище температури поліморфного перетворення сплаву зі швидкістю 50 ... 300<sup>0</sup>С / с, після чого деформують зону з'єднання зі ступенем деформації 10-70% з одночасним охолодженням зони з'єднання до температури 10...350<sup>0</sup>С нижче температури поліморфного перетворення. Ізотермічну витримку проводять при вказаній температурі охолодження протягом 10-108 секунд і тиску 0,4 ... 0,95 від межі текучості сплаву при температурі ізотермічної витримки [86-89].

Запропоновано спосіб [147] ЗТ двох елементів, при якій на одній з поверхонь, що зварюються виконують виступ, а на торці другу зварюваного елементу виконують макровиступ, товщиною 0,4-0,7 від товщини виступу. Макровиступи вдавлюють на 1-1.5 їх висоти в виступ, що дозволяє контролювати максимальну фактичну площу контакту. Співвідношення ширини макровиступа до його висоті становить (1-3):1. Зони вільної деформації виконані у вигляді макровиступов на одній з поверхонь, що зварюються. Таким способом збільшуються фактична площа контакту поверхонь, що зварюються. Зону стику для зварювання обробляють електронним променем малої потужності з нагріванням до температури виключає пластичне деформування. У технічному рішенні нагрівають тільки одну з деталей, що зварюються, що дозволяє контролювати максимальну фактичну площу контакту [106, 107].

Перспективним напрямком є з'єднання процесів ЗТ з надпластичним формуванням для отримання кінцевого виробу. Існують роботи, в яких успішно отримані вироби з з'єднанням цих двох процесів.

В роботі [148] дифузійне зварюються титанові листи ВТ6. Для поліпшення якості дифузійного з'єднання зварювання здійснюється через прокладки з листового прокату з підготовленою структурою (розмір зерна 0,5-1,0 мкм). Прокладки використовують з того ж сплаву, що і заготовки, або з іншого титанового сплаву, які навіть при рівному або великому розмірі зерен має меншу напругу течії, ніж сплавів з якого виготовлені заготовки. Різниця між розмірами зерен в прокладках і заготовках забезпечує більш активний перебіг дифузійних процесів. За рахунок використання більш пластичних, ніж заготовки, прокладок розподіл напружень в зоні з'єднання наближено до вирішення

Прандтля завдання про стиснення тонкого пластичного шару кінцевої товщини між жорсткими пластинами. Наявність пластичної зони сприяє здійсненню необхідного фізичного контакту, що запобігає появі надрізів і скупчення мікропор на периферії ділянок з'єднання. Чим менше розмір зерен в прокладці, тим краще матеріал прокладки заповнює мікронерівності на поверхні заготовок. Пояснюється це, тим, що розмір зерен в прокладанні можна порівняти з розміром дрібних мікронерівностей на поверхні заготовок і більш активно при деформації протікають процеси зернограничного проковзування [108, 109].

На підставі вищевикладеного, можна прийти до висновку, що виникнення пір в зоні освіти фізичного контакту залежить від розподілу напружень в зоні з'єднання, і їх переважне розташування відповідає розташуванню жорстких зон. Дефекти у вигляді мікропор усуваються, але віддалені від периферії перетину, тому не призводять до виникнення небезпечних перетинів.

Чим дрібніше зерно, тим вище швидкість росту зерна. У рекомендаціях зазначено, що прикладати тиск необхідно нижче температури дифузійної зварювання. Після процесу формування рекомендовано здійснювати витримку виробу під внутрішнім тиском протягом часу 30-60 хв, яку можна розглядати як продовження процесу ЗТ, під час якого збільшується об'ємна частка  $\beta$ - фази, яка в умовах всебічного стиснення заповнює пори. Також відбувається повне вирівнювання розмірів зерен в готовому виробі [115].

У запропонованій роботі ЗТ три заготовки з титанового сплаву ВТ6 завтовшки 1 мм з розміром зерна 3мкм. Прокладки товщиною 0,3 мм з розміром зерна 1,5мкм. На всіх ділянках, що не піддаються ЗТ наносили антидифузійним покриття смужками шириною 36 мм. У першому випадку пакет нагрівається до  $850^{\circ}\text{C}$ , прикладається тиск 2МПа і витримується під тиском 2 години для здійснення ЗТ. Після охолодження пакет переміщали в оснащення для надпластичної формування, яка протікає при  $850^{\circ}\text{C}$ , тиск газу змінювали до 2,5 МПа для забезпечення швидкості деформації  $10^{-3} - 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ . Після формування штамп охолоджували в печі до  $40^{\circ}\text{C}$ . У другому випадку, в процесі нагрівання пакета до  $850^{\circ}\text{C}$  при досягненні температури  $750^{\circ}\text{C}$  до пакету прикладали

зусилля 2МПа. Після формування, що не охолоджуючи штамп і не знімаючи тиску підвищували температуру до  $900^{\circ}\text{C}$ , а тиск - до 3МПа, витримка - 40 хв. [116 -118].

### **1.3. Формування виробів в умовах короткочасної повзучості та надпластичності**

В наш час перед виробництвом виникає проблема утворення метало і енергозберігаючих технологічних процесів виготовлення деталей. Одним з найбільш перспективним направленням, яке забезпечує економію практично на всіх стадіях виготовлення, являється деформування в умовах надпластичності [33].

В технологіях обробки матеріалів тиском широко використовують явище надпластичність, яке надало можливість використовувати нетехнологічні матеріали ( важкодеформовані і малопластичні ) [113].

При обробці металів в умовах надпластичної течії вдається досягти збільшення границь міцності і текучості при одночасному підвищенні пластичності при кімнатній температурі і знизити анізотропію механічних властивостей.

Надпластичність – явище аномально високої пластичності металів, яка проявляється при утворенні ультрадрібнозернистої структури і деформації в відповідних температурно-швидкісних умовах ( $T_{\text{деф}} = 0,4 - 0,7T_{\text{пл}}$ ,  $\varepsilon = 10^{-4} - 10^{-2}\text{с}^{-1}$ ).

Актуальність вивчення природи надпластичності полягає у вивченні природи кристалічних матеріалів та їх властивостей, а також прикладне використання. Для практики важливо збільшення швидкості і зниження температури деформації.

Надпластична течія характеризується наступними ознаками: специфічним характером залежності істинних напружень від ступеня деформації, високою швидкісною чутливістю напруження течії, значним рівномірним подовженням без утворення шийки.

Головними перевагами використання надпластичної деформації:

- підвищення коефіцієнту використання металу до 0,7-0,8;
- виготовлення деталей унікальними розмірами на серійному обладнанні;
- заміна механічної обробки і лиття на штампування підвищення рівня механізації робіт;
- можливість заміни сплавів для лиття на деформовані;
- обробка сплавів в надпластичному стані суттєво збільшує службові властивості, внаслідок чого можливо підвищити ресурс виробу на 15-20%.

Важливо встановити при процесі надпластичної деформації зв'язок між зовнішніми параметрами деформування (зусиллям, переміщенням, швидкістю інструменту), оцінити напружено - деформований стан, накопичену деформацію. Надпластичну течію порівнюють до течій в'язких рідин і тіл, використовуючи ряд моделей для інженерних розрахунків.

Реологічний закон Ньютона або лінійна модель:

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1.3.)$$

де  $\tau$  - дотична компонента тензора напружень;

$\frac{\partial v}{\partial y}$  - поперечний напрям течії швидкості зсуву;

$\mu$  - поперечний напрям течії швидкості зсуву.

Модель Бінгама – Шведова

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\varepsilon} \sqrt{3} \quad (1.4.)$$

де  $\dot{\varepsilon}$  - швидкість деформації

Особливістю механічної поведінки матеріалу в стані надпластичності аномально висока чуттєвість напруження до швидкості деформації, яку кількісно характеризують параметром швидкісної чутливості матеріалу  $m$ . Для матеріалів які не перебувають у стані надпластичності, величина параметра  $m \leq 0,1$ , а  $m \geq 0,1$  відповідає ньютонівській рідини.

### Нелінійна модель

$$\sigma = K \dot{\varepsilon}^m \quad (1.5)$$

Де  $\sigma$  - напруження,

$K$  і  $m$  - постійні матеріалу.

Модель О.М. Смірнова:

$$\sigma = \sigma_s \frac{\sigma_0 + K_v \dot{\varepsilon}^{m_v}}{\sigma_s + K_v \dot{\varepsilon}^{m_v}} \quad (1.6)$$

де  $\sigma_0$  - границя напруження,  $\sigma_s$  - границя міцності.

Дані моделі недостатньо враховують структурні зміни в матеріалі, що обмежує їх область застосування. Визначальні співвідношення з внутрішніми змінними, що враховують структурні зміни, розглядають модель фізичного механізму надпластичності як феноменологічне співвідношення між напруженням і деформацією. Константи, що входять до співвідношення, тільки ті, які можна визначити з макроексперимента, матеріал вважається нестисливим, пружні деформації - малі. Девіатор швидкостей не пружних деформацій пропорційний девіатором напружень Коші, зв'язок других інваріантів цих тензорів задається універсальною кривою надпластичності [134-136].

Крива надпластичності це залежність істинних напружень від істинної швидкості деформації в логарифмічних координатах, графік має характерний сигмоїдальний вигляд, тому його називають сигмоїдальна крива. Результати для побудови кривої отримують з випробувань на одноосьовий розтяг або стиск суцільних циліндричних або розтягування плоских зразків [34].

Прийнято розглядати три стадії надпластичності. Перша стадія спостерігається при низьких швидкостях деформації, супроводжується зростанням зерен в ході деформації. Друга стадія досягається у вузькому інтервалі швидкостей деформації, середній розмір зерен не змінюється, практично не змінюють своєї форми. Третя стадія виникає при високих швидкостях деформації, характеризується подрібненням зерна.

Вперше на зв'язок між високими значеннями ступеня  $m$  і надпластичності

визначив Бєкофен. Він показав, що існує залежність між  $m$  і відносним подовженням.

Існує ряд проблем при використанні явища надпластичності, наприклад невисока продуктивність процесу через відносно низькі швидкості деформації. Надпластична формовка протікає при високих температурах, при яких виникає ряд технічних труднощів, наприклад утворення альфірованого шару на поверхні титанових сплавів. Тому задача зниження температури процесу є актуальною. Для зниження температури процесу використовують ефект низькотемпературної надпластичності, для реалізації якої необхідна спеціально підготовлена структура сплаву [78].

Граничним напруженням прийнято вважати напруження, обумовлене впливом міжфазних і міжзеренних границь і домішок у вигляді виділень по границях зерен. Механіки розглядають граничне напруження з іншого боку: якщо граничне напруження дорівнює нулю, тіло, що деформується, розглядають як рідину і для аналізу розглядають методи гідродинаміки, якщо більше нуля, то це вязкопластичне тверде деформоване тіло.

Для широкого класу промислових матеріалів – сплавів на основі магнію, алюмінію, нікелю і заліза, для утворення дрібнозернистої структури найбільш ефективні методи гарячого пресування, осаджування, холодне прокатування з подальшим відпалом.

Необхідні наступні металургійні передумови для оптимізації процесів надпластичності :

присутність другої фази для збереження дрібного зерна. Друга фаза стримує зростання зерен при процесі надпластичної течії ;

друга фаза повинна бути того ж порядку, що і міцність матриці. Якщо друга фаза дуже тверда, на поверхні розділу частинок будуть утворюватися пори, які шкідливо позначаються на низькотемпературних властивостях;

- розміри і розподіл часток другої фази можуть знижувати кількість пор, що утворюються в процесі деформування. Якщо друга фаза значно твердіше матриці, але присутній у вигляді дрібних, одноріднорозподілених частинок,

утворення пор може бути зменшене за рахунок дії різних зворотних механізмів;

- будова границь зерен повинна бути висококутовим. Зернограничне проковзування по малокутовим границям важко здійснюється;

- границі зерен повинні бути рухливими. Здатність границь зерен переміщатися дозволяє зменшити концентрацію напруження за рахунок міграції границь. Форма границь зерен в надпластичних матеріалах залишається рівновісна після великих деформацій, що свідчить про міграцію границь зерен;

- форма зерен повинна бути рівновісна. Границі зерен повинні відчувати напруження зсуву - механізм зернограничного проковзування. У матеріалах з витягнутими зернами не спостерігається інтенсивного зернограничного проковзування в поздовжньому напрямку;

- границі зерен повинні опиратися розділенню зерен при розтягуванні. Відрив по границях зерен може бути результатом високої зернограничної енергії, властивій керамічним матеріалам.

Нездатність зерен легко мігрувати може ускладнювати прояв надпластичності .

Низькотемпературна надпластична формовка ефективна в методах обробки листових матеріалів. Суміщення надпластичної формовки з іншими процесами, наприклад зі зварюванням під тиском, відкрив перспективу отримання деталей складної конфігурації, які іншими технологіями виготовляти не рентабельно [43].

Практичне використання ефекту надпластичності бачимо в технології виготовлення порожнистих виробів зварюванням тиском для авіаційного машинобудування. В результаті отримуємо тонкостінний виріб складного профілю на малопотужному пресовому обладнанні з використанням простого штампового оснащення з високим коефіцієнтом використання матеріалу, низькими енергетичними затратами.

Надпластичність притаманна різним кристалічним матеріалам - металевим сплавам, інтерметалідам, кераміки. Тому надпластичність, як явище, використовують в технологіях виготовлення деталей з важкодеформуємих і малопластичних матеріалів. Структурна надпластичність властива



полікристалічним матеріалами з дрібнозернистою рівноосною мікроструктурою. Подрібнення зерен в сплаві призводить до зміни хімічного складу фаз, що знижує надпластичні властивості. Для максимального подовження необхідно стабільна мікроструктура. Рекордні подовження проявляють евтектичні і евтектоїдні сплави з мікродуплесною мікроструктурою. Під часу процесу надпластичності в таких сплавах мікроструктура залишається стабільною [79].

Ознаки надпластичності проявляються в певних умовах. Принципове значення має структурний стан матеріалу, що деформується, температурні умови і швидкість деформування. Стан надпластичності характеризується підвищеною чутливістю напруження течії до зміни швидкості деформації, великим ресурсом деформаційної здатності та напруженням течії матеріалу, яке значно менше межі текучості. Сильна залежність напруження течії від швидкості деформації наближає матеріали по реологічним ознаками до в'язкої рідини. В'язкість матеріалу обумовлює здатність текти під дією напружень менше границі плинності в пластичному стані [80].

Встановлено дію в умовах надпластичності декількох механізмів – проковзування зерен по границям, внутрішньозернова дислокаційне ковзання, дифузійна повзучість, головна особливість розвитку яких знаходяться в тісному взаємозв'язку, коли реалізується сприятливі комбінації механізмів. Внаслідок розвитку цих комбінації механізмів не виникає накоплення дефектів в металі і спостерігається відносно малі структурні зміни. Мікроскопічна причина реалізації такої комбінації діючих механізмів деформації являється те, що в ультрадрібнозернистих надпластичних матеріалів границі зерен являються ефективним джерелом і стоком дефектів решітки. Активні дифузійні процеси на границях зерен визначають здатність поглинання границями решіткових дислокацій, а легкість їх генерації на границях обумовлена локальними концентраціями напружень, які викликаними проковзуванням зерен відносно один одного. Внутрішньо зернова дислокаційне ковзання, дифузійна повзучість грають роль додаткових та допоміжних (акомодаційних) механізмів. Головним механізмом здійснення надпластичної деформації це коопероване зернограничне

проковзування. Він дозволяє описати цілісну картину течії матеріалу при надпластичному деформуванні, об'єднуючи в одне ціле механізми надпластичного деформування різних рівнів [48-49].

В умовах надпластичності виникає додатковий деформаційний процес – зернограничне проковзування. Зернограничне проковзування як механізм явища надпластичності розглядається як неспростовний факт. Можливе виникнення специфічної взаємодії між границями зерен, що призводять до їх об'єднання в стійкі утворення - кластери. Саме вони визначають появу нової деформаційної моди - кооперованого зернограничного проковзування [81].

Активність механізмів надпластичної деформації змінюється в залежності від температурно – швидкісних умов деформування. При підвищених швидкостях або низьких температурах зростає роль внутрішньо зернового дислокаційного ковзання, а при низьких швидкостях та підвищених температурах активізується дифузійна повзучість, але зернограничне проковзування залишається головним механізмом деформації.

Розрізняють два способу досягнення стану надпластичності:

- деформування металу або сплаву в процесі фазового перетворення або якого-небудь дифузійного процесу, які пов'язані з перебудовою кристалічної решітки;
- деформування сплаву в дрібнозернистій структурі (розмір зерен не більше 1-5мкм) [82].

Надпластичні матеріали займають проміжне положення між пластичним твердим тілом і в'язкою рідиною. В області теорії процесів об'ємного деформування металевих матеріалів в стані надпластичності можуть бути використані теорії повзучості, механіка течії в'язких рідин [83].

Надпластична деформація як нове явище, було виявлено при переході від крупнозернистих матеріалів до матеріалів з розмірами зерен в одиниці мікрон. Сьогодні одним з перспективних напрямів є вивчення впливу розміру зерна на умови процесу надпластичної деформації [52].

Зменшення розміру зерен сприяє зниженню нижньої границі

температурного інтервалу надпластичної деформації. Такі залежності характерні для більшості дрібнозернистих матеріалів, але існують винятки. Подрібнення зерен в деяких сплавах призводить до зміни хімічного складу фаз, що призводить до зменшення пластичних властивостей. Важливим фактором, що впливає на максимальне подовження, є стабільність мікроструктури. Рекордні подовження проявляють евтектичні і евтектоїдні сплави з мікродуплексною мікроструктурою. У чистих металах і однофазних сплавах з вихідною дрібнозернистою структурою при нагріванні до температури надпластичної деформації спостерігається інтенсивне зростання зерен, надпластичні властивості виявляються в короткий період поки зерна не виростають до розмірів більше 10мкм .

Відносне подовження при розтягуванні металів залежить не тільки від вихідної структури і коефіцієнта швидкісної чутливості напруги течії, а й від фазового складу і структурних змін у процесі деформацій .

При високих температурах деформаційні характеристики матеріалів усередині зерен і в прикордонній області можуть різко відрізнятися. Отже, важливо враховувати вплив мікроструктури на механізм деформації і пластичні властивості металів. Результати експериментів показують, що розмір зерен в загартованому сплаві впливає на міцності і на пластичні властивості сплаву.

Пластичність крупнозернистого сплаву слабо залежить від температури, значно сильніше від температури залежить пластичність дрібнозернистого сплаву. Сплави, що мають надлишкові фази, показують значно більше питоме подовження, ніж однофазні матеріали. На ефект надпластичності робить сильний вплив попередня пластична деформація. Вплив кристалографічної текстури на ефект надпластичності вивчено вельми слабо.

При розробці режимів підготовки структури к надпластичної деформації необхідно прагнути не тільки к отриманню найбільш дрібного зерна, але і сприятливу кристалографічну текстуру в напівфабрикатах. Вплив металічної основи на формування дрібнозернистої мікроструктури проявляється через енергію дефекту упаковки. Тому найбільшу складність в отриманні дрібнозернистої структури являють алюмінієві сплави, що обумовлюється її

високою енергією дефектів в упаковці.

Вплив легування на утворення дрібнозернистої структури проявляється через зниження енергії дефектів упаковки сплавів і в результаті її стабілізації, за рахунок утворення фаз, які обмежують ріст зерен. Зміну розчинності легованих елементів в фазах при термічній обробці можна отримати необхідний розмір і розподіл вторинних виділень, що ефективно сприяє формуванню дрібного зерна в алюмінієвих і нікелевих сплавах.

Технологічні процеси обробки металів тиском на базі ефекту надпластичності відкривають необмежені можливості. Отримання великих деталей за один перехід при малих питомих зусиллях дає можливість створювати нові умови для обробки металів тиском. В режимі надпластичності можливо здійснювати такі технологічні процеси, які характеризуються великою трудомісткістю, або вважаються нездійснимим, наприклад із-за великої кількості переходів, ламкості сплавів або із-за великого опору деформуванню.

Ефект надпластичності спостерігається в більшості металів і сплавів при деформуванні їх в області температур  $(0,5-0,7)T_{пл}$ , однак в деяких випадках надпластичність була виявлена і при більш низьких температурах. Надпластичність можна визначити як особливий стан металів і сплавів, які характеризуються виключно високою здатністю деформуватися без руйнування (інколи відносне подовження досягає 100% і більш, поперечне звуження шийки завжди близько до 100%); опір деформації при цьому зазвичай не перевищує  $(0,1-0,15)\sigma_B$  ( $\sigma_B$  – границя міцності при кімнатній температурі), тобто суттєво нижче, ніж при температурі напівгарячої деформації.

Підсумовуючи експериментальні та теоретичні факти, виділяються загальні уявлення ефекту надпластичності [84, 85] :

- структурна надпластичність властива полікристалічним матеріалами з дрібнозернистою рівноважною мікроструктурою ( $\leq 10\text{мкм}$ ).

Субмікрокристалічної (СМК) матеріали  $-0,1 \leq d_{сер} \leq 1\text{мкм}$ , наноструктурні (НС) або нанокристалічні (НК) матеріали  $-0,01 \leq d_{сер} \leq 0,1\text{мкм}$ ;

- температура деформації повинна бути  $T_0 = 0,5 - 0,8T_{nl}$  ;
- спостерігається «сігмаїдальна» залежність напруження течії від швидкостей деформації в логарифмічних координатах на ділянці найбільшого нахилу діаграми напруження - швидкості деформації відносно подовження максимальне, значення досягають тисячі відсотків;
- чим менше розмір зерна, вище температура, тим більше швидкість деформації
- при деформації в оптимальних умовах структура матеріалу практично не змінюється.

Немає конкретних рекомендацій які оптимальні повинні бути температура, діапазон швидкостей деформацій для прояву надпластичності у матеріалу з відомим розміром зерна. Актуальній задачі для теорії і для практики є знаходження оптимальних умов надпластичності.

Розрізняють деформацію в стані надпластичності та режим надпластичності. В стані надпластичності деформується матеріал з мікрокристалічною будовою, в режимі надпластичності – з крупнозернистим, успішно використовують для подрібнення зерна.

Деформація в режимі надпластичності часто називають ізотермічне штампування. Але ізотермічне штампування означає лише однакову температуру заготовки і штампу, і як правило температурно - швидкісні умови ідентичні зі штампуванням в умовах надпластичності. Головна відмінність в цих двох процесах параметри вихідної структури заготовок.

Ізотермічне штампування стає штампуванням в умовах над пластичності, коли заготовка з дрібнозернистою структурою, і в результаті отримуємо однорідні і рівномірні властивості в готових виробах. При ізотермічному штампуванні великогабаритних виробів для вирівнювання структури потрібно вводити додаткові операції, при штампуванні в умовах надпластичності в цьому немає необхідності.

Технологію об'ємного штампування в умовах надпластичності застосовують у виробництві дисків з титанових сплавів з дрібнозернистої або

крупнозернистою структурою. Однією з особливостей деформації титанових сплавів в умовах НПФ є перетворення крупнозернистою пластинчастої структури в глобулярну. Вихідна структура заготовки робить істотний вплив на структуру і властивості виготовлених деталей. Диски отримані штампуванням із заготовок з вихідною крупнозернистою структурою успадковують неоднорідну структура прутка, з глобулярною структурою отримуємо з матовим відтінком однорідну макроструктуру. Властивості зразків виготовлених з диска з глобулярної структури більш стабільні і не залежать від напрямку їх вирізання. Використання надпластичної деформації дрібнозернистих заготовок спрощує подальшу термообробку отриманих виробів, замість двоступеневого відпалу обмежуються одним низькотемпературним.

При штампуванні об'ємних деталей в умовах надпластичності маємо високоточне заповнення штампів складної конфігурації, значне збільшення стійкості інструменту. В результаті отримуємо готовий виріб з незначними зовнішніми і внутрішніми дефектами, високою якістю і чистотою поверхні, спостерігаємо зменшення анізотропії механічних властивостей матеріалу.

В основі операції НПФ лежить явище надпластичності матеріалів, що полягає в можливості сприймати великі деформації (до 1000%) без руйнування, при певних температурно-швидкісних параметрах процесу і структурі матеріалу. При формотворчих операціях технологічного процесу необхідно, щоб матеріал, протягом усіх операцій, зберігав постійну дрібнозернисту структуру, в іншому випадку, при зростанні зерна показники надпластичності будуть погіршуватися, що призведе до нерівномірності деформації [127].

Використання формотворчих операцій, заснованих на явищі надпластичності, має ряд переваг:

- уможливорює отримання деталей складної форми, за рахунок високої деформаційної здатності;
- дозволяє знизити напруження течії, а за рахунок цього і потужність обладнання;

- дозволяє підвищити коефіцієнт використання матеріалу (KIM) і знизити трудомісткість обробки.

З конструкторсько-технологічної точки зору основною особливістю, що ускладнює застосування явища надпластичності, поряд з низькою продуктивністю, є різнотовщинність стінок виробу після формоутворення, викликаній механікою процесу течії металу при деформації. Сили тертя, що виникають при контакті поверхонь заготовки з поверхнями матриць штампів, перешкоджають плинності металу в місцях, ще не вступили в контакт з матрицями штампа [68].

Для зниження впливу цієї особливості на готовий виріб застосовують такі способи: попереднє профілювання заготовки, формування в нерівномірному температурному полі, формування з обмеженою витяжкою і ін. При цьому доцільно застосування методів математичного моделювання і оптимального проектування, об'єднуючи в єдиний комплекс кінцево-елементний рішень і алгоритми оптимізації [126, 127].

#### **1.4. Висновки до розділу 1**

1. Виходячи з вищевикладеного було вирішено розробити процес формоутворення порожнистої вентиляторної лопатки з титанового сплаву для газотурбінних двигунів.

2. Історія авіабудування в цій області підтверджує, найбільш доцільним є конструкція і технологія лопатки з титанових сплавів типу ВТ6, оскільки лопатки, вироблені з титану, виходять тонше, тобто вони мають кращу аеродинаміку. Збільшення аеродинамічного опору сприяє збільшенню ступеня двоконтурності авіаційних ГТД.

3. В виготовленні вентиляторних лопаток застосовують титанові сплави через малу питому масу. Проте, титанові сплави чутливі до концентраторів напружень, якими є антивібраційні полки. Тому в наступному поколінні вентиляторних лопаток в конструкції відсутні антивібраційні полки. Подальша модернізація полягає в усуненні головного недоліку надмірної маси. Питання по

зниженню маси вирішується поєднанням напрямків: вдосконалення конструкції лопатки, використання сучасних матеріалів та технологій. Внаслідок виникло наступне покоління вентиляторних лопаток – полегшені. Виділилося кілька напрямків виготовлення полегшених лопаток вентилятора ГТД в залежності від матеріалів: створення металевих порожнистих лопаток, виготовлення лопаток з композитних матеріалів, і поєднання двох способів - гібридні лопатки і лопатки складової конструкції.

4. Створення технології виготовлення порожнистих металевих лопаток вентилятора є однією з головних задач в двигунобудуванні. Проведені в останні десятиліття дослідження показують, що високу ефективність при виготовленні порожнистих конструкцій забезпечує технологічний процес, заснований на поєднанні пластичного формування в ізотермічних умовах (надпластичність) зі зварюванням під тиском. Титанові сплави проявляють високу пластичність в ізотермічних умовах при поліморфних та структурних перетвореннях. Це дозволяє отримати вентиляторну лопатку потрібної товщин та надати складну тривимірну форму, що неможливо досягти використовуючи композитні матеріали.



## **2. Конструкторсько -технологічний розділ**

### **2.1. Класифікатор конструкторсько – технологічних рішень типових елементів порожнистих лопаток**

Велику роль у вирішенні завдання пошуку нових методів виготовлення елементів порожнистих лопаток грає класифікація технологічних рішень. Завдання будь-якої класифікації полягає не тільки в систематизуванні існуючих форм, конструкцій але і в проектуванні нових процесів та елементів, які не застосовуються через відсутність нових технологічних рішень [123].

Класифікація технічних рішень поперечного перерізу лопаток виконана на основі еволюції конструкції вентиляторних лопаток.

Вентиляторна лопатка з суцільним тілом пера, має антивібраційні полки, що забезпечують її динамічну міцність. Значне зменшення маси лопатки було досягнуто при використанні широкохордних лопаток з суцільним поперечним перерізом. В наступних конструкціях збільшення ефективності по масі досягається шляхом використання порожнистих перерізів пера лопатки, як в суцільному виконання так і в складній конструкції.

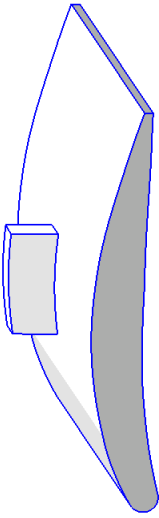

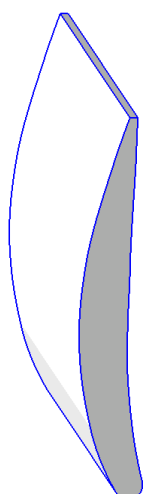
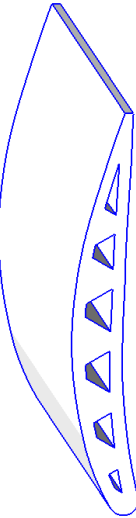
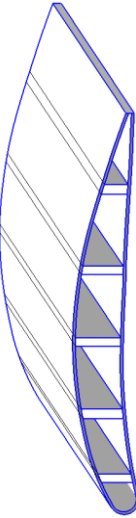
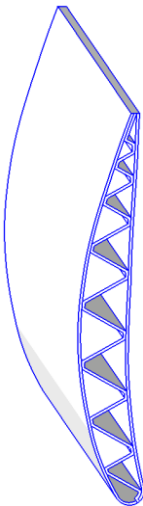
Основною задачею удосконалення вентиляторних лопаток є зниження маси пера лопатки за рахунок конструктивно - технологічних рішень при збереженні експлуатаційних параметрів (властивостей статичної та динамічної міцності).

На основі узагальнення етапів еволюції конструкції вентиляторної лопатки побудована класифікація технічних рішень конструкції вентиляторної лопатки, яка представлена в табл. 2.1.

Порожністі металеві лопатки ГТД можуть бути згруповані:

- 1) По спільності конструктивних (геометричних) ознак;
- 2) По спільності технологічних ознак;
- 3) По спільності конструктивно - технологічних ознак;

Таблиця 2.1. Класифікація технічних рішень конструкції вентиляторних лопаток

№ класу	Типове технічне рішення	Типове технічне рішення	Основна конструктивна ознака	Література	Відносна маса конструкції	Зниження маси
0	Вентиляторна лопатка з антивібраційними полками		Антивібраційні полки знижують вібронапруження		110%	
1	Суцільна лопатка (широкохордна)		Лопатки мають велику жорсткість		100%	
2	Полегшена лопатка з каналами (хаотичними, поздовжніми)		Висока відносна товщина профіля, яка обмежена робочим інструментом та технологією виготовлення	[151, 152, 153, 28, 154, 155]	85-90%	
3	Полегшена лопатка з набором лонжеронів		Використання окремих та поперечних повздовжніх силових елементів приводить до збільшення маси та трудомісткості за рахунок з'єднання.	[149, 150, 156, 157, 158, 159]	60-70%	
4	Порожниста лопатка з листовим наповнювачем		Конструкція, яка містить листовий наповнювач, є найбільш оптимальним варіантом, що забезпечує статичну та динамічну міцність	[160, 62, 161, 162, 163, 125]	50%	

Лопатки з набором лонжеронів складаються з металевої обшивки і несучих навантаження стрижнів з односпрямованих-армованого композиційного матеріалу, тобто об'єднання металевих сплавів і композиційних сплавів (рис. 2.1.). В якості матеріалу несучих стрижнів високоміцні і високомодульні композиційні матеріали (вуглепластик, вуглеалюміній, боропластик, боралюміній, алюміній армований керновими волокнами карбїду кремнію, титан армований волокнами карбїду кремнію) [67, 149, 150].

Порожниста металева лопатка характеризується двома конструктивними елементами - «наповнювач» і «обшивка» (рис. 2.1.). Кількісні зміни одного з конструктивних елементів змінює форму і функції, що сприяє до придбання нових якостей. Зміна конструктивних елементів безпосередньо впливає на характеристики міцності деталі, на основу технологічного процесу і на методи формоутворення.

Розроблений класифікатор є основою для вибору конструктивно-технологічних рішень при проектуванні лопатки. Кожен з класів має свої різновидності форм та елементів конструкції.

Розширюється і деталізується класифікація введенням таких параметрів, як закрутка пера і поперечний переріз лопатки, конфігурація і розташування елементів наповнювача, товщини обшивки, поєднання матеріалів наповнювача і обшивки.

Найбільш перспективним по масовій ефективності є лопатки 4 класу – порожнисті лопатки. Далі розглядаємо їх розвиток конструкції.

Принципово конструктивними ознаками (геометричними ознаками) порожнисті лопатки можна об'єднати в три підкласи:

- 1-й клас – лопатки з обшивки без наповнювача (рис. 2.2) [164];
- 2-й клас – лопатки з обшивки з листовим наповнювачем (табл. 2.1);
- 3-й клас – лопатки з обшивки з стрижневим наповнювачем (рис. 2.1) [150, 157].



Рис. 2.2. Групування по часним конструктивними ознаками порожнистих лопаток класу 1

Металева порожниста лопатка в залежності від наповнювача розрізняється на гофровий або комірчастий тип. Лопатка гофрового типу може мати ребра жорсткості прямі, похилі або  $s$  – образні. Конфігурація гофрового наповнювача залежить від ширини з'єднання наповнювача з обшивкою та відстанню між зонами з'єднання. Збільшуючи відстань між зонами з'єднання та зменшуючи зону зварювання ребра більш похилі. Наповнювач гофрового типу може бути з одного або двох листів (табл. 2.1.).

Для порожнистих лопаток комірчастого типу варіант з'єднання наповнювача з оболонками обшивок більш складніший (табл. 2.1.). Порожністі лопатки комірчастого типу більш складніші в технологічному аспекті. Необхідні допоміжні отвори для подачі тиску між комірками. Якщо комірки не однакового розміру, необхідно реалізувати подачу різного тиску до них. У порожнистій лопатки комірчастого типу площа з'єднання наповнювача з обшивкою збільшується, що приводить до збільшення міцності та надійності, але збільшується маса.

Встановити взаємозв'язок між існуючими технологічними процесами виготовлення полегшених вентиляторних лопаток складно, внаслідок різноманітності використовуваних методів і матеріалів. Одним з основних напрямків виготовлення порожнистих лопаток є знаходження способу з'єднання обшивки і наповнювача. В основі класифікації способів виготовлення порожнистих лопаток виступають процеси формування обшивки і внутрішніх порожнин лопатки.

Таблиця 2.1. Групування по часним конструктивними ознаками порожнистих лопаток класу 2

Тип наповнювача	
Гофрового типу	Комірчастого типу
Прямі ребра жорсткості (1 лист) [165]	Прямі ребра жорсткості (багатошарові) [165]
	
Похилі або S – образні вигнуті ребра жорсткості (1 лист), з більшою площею контакту наповнювача з обшивками [166]	Рибра жорсткості бочкоподібні (2 листа) [166]
 	
	Рибра жорсткості з поздовжнім листом (3 листа)
	

Вибір і комбінація процесів виготовлення порожнистої лопатки залежить від конструкторського рішення спроектованої деталі. Головними визначальними технологічного процесу є форма лопатки, матеріал наповнювача і обшивки, вид наповнювача.

На підставі цього вибрана та узгоджена з замовником конструкція металевої порожнистої лопатки з гофровим наповнювачем.

В конструкції порожнистої лопатки поєднано елементи, які використовуються в інших типах порожнистих деталях. Порожністі конструкції набувають широкого використання в інших галузях. Вони поєднали в собі дві головні риси: зменшення маси без втрати стійкості. Розглянемо детально металеву порожнисту лопатку гофрового типу. На рис. 2.3. представлена еволюція зміни форми порожнистої конструкції від простої форми до складної форми вентиляторної лопатки.

На технологічні параметри процесу виготовлення порожнистої лопатки впливають конструктивні особливості елементів. Головні конструктивні особливості порожнистої лопатки:

$B$  – загальна ширина пера, яка залежить від конструктивних особливостей ГТ двигуна, величина може бути постійною або змінюватися по довжині лопатки;

$B_1, B_2, B_3, B_4 \dots B_n$  – відстань між зонами з'єднання на одній поверхні обшивки, може бути постійною величиною, або змінюватися;

$K_5$  – довжина дифузійного з'єднання;

$f$  – загальна висота;

$S_1$  та  $S_2$  – товщини обшивки, теоретично  $S_1 = S_2, S_1 > S_2, S_1 < S_2$ ;

$S_3$  – товщина наповнювача, величина постійна, теоретично  $S_3 = S_2 = S_3, S_3 = S_1 \neq S_2, S_3 = S_2 \neq S_1, S_3 < S_1, S_2, S_3 > S_1, S_2$ ;

$S$  – товщина з'єднання наповнювача та обшивки;

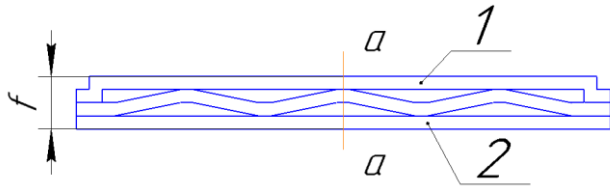
$\alpha_1, \alpha_2$  – кути нахилу ребр наповнювача, залежать від  $f$  та шагу  $B_1$ ;

Актуальним питанням залишається кількість зон з'єднань наповнювача та обшивки та відстань між ними. Можуть бути наступні схеми: однакова кількість зон з'єднань на кориті та спинки пера лопатки, на спинки пера більше з'єднань, а на кориті менше та навпаки.

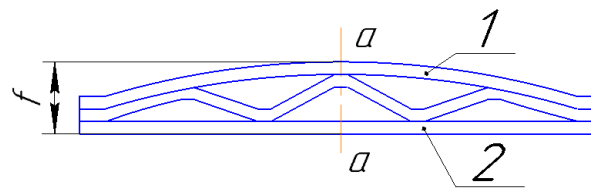
На рис. 2.3. показано дві конструкції порожнистої лопатки які відрізняються характером розташування зон з'єднань по внутрішній поверхні обшивки. Це суттєво вплине на роботу лопатки при високих температурах, зазнаючи великі статичні, вібраційні та температурні напруження, оскільки наповнювач виконую роль демпфера коливань.

Можливо спрогнозувати, що товщина  $S_1$  та  $S_2$  впливатимуть на формоутворення обшивки, висота  $f$  вплине на формоутворення ребр наповнювача та на якість з'єднання обшивки. Для більш конкретних висновків необхідно встановити взаємозв'язок між всіма конструктивними характеристиками та технологічними параметрами. Для цього необхідно проводити математичне моделювання та експеримент.

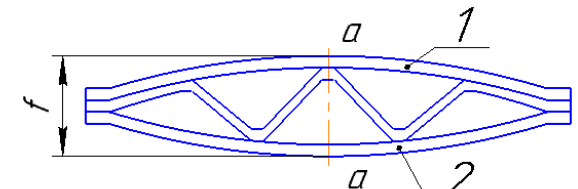
Для отримання порожнистої лопатки необхідно вирішити наступні задачі: проектування оснащення та установки для формоутворення фрагмента порожнистої лопатки, проведення випробувань по деформуванню титанових сплавів в умовах надпластичності, проведення випробувань по дифузійній сварці конструктивних елементів, технологічні дослідження деформування листового титана в умовах надпластичності, випробування заготовок на міцність та герметичність, відпрацювання технології формоутворення пера лопатки. Для вирішення поставлених задач була прийнята спрощена форма фрагменту металевої порожнистої лопатки гофрового типу, яка складається з трьох титанових листів (рис. 2.4.).



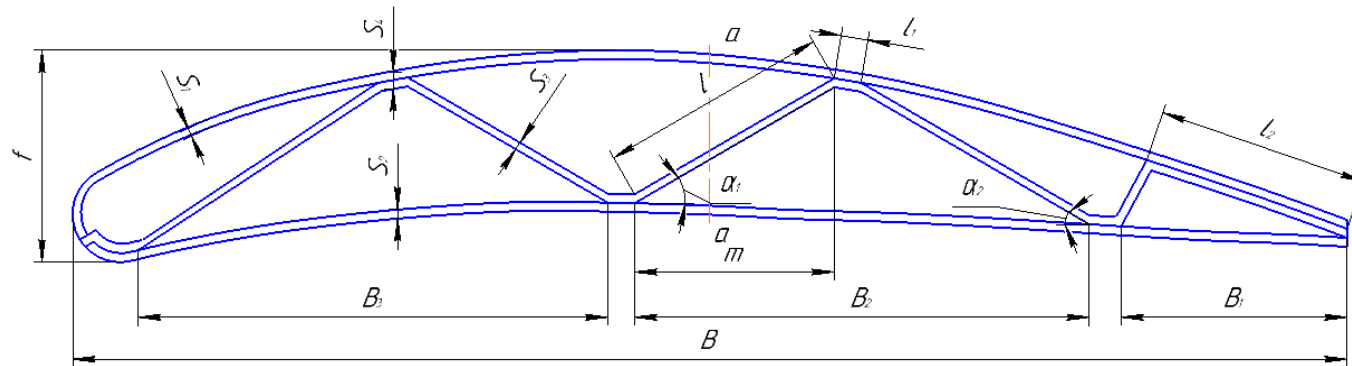
профіль симетричний,  
1 – формується, 2 - плоский



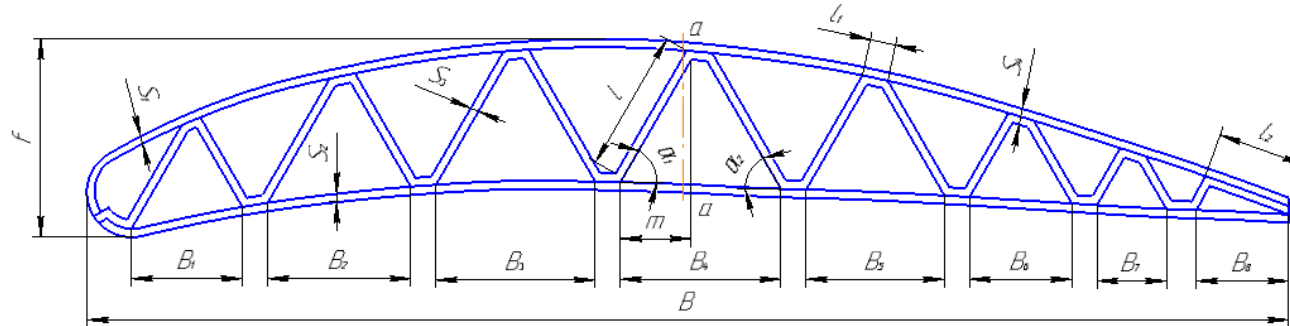
профіль симетричний відносно а-а,  
1 – формується, 2 - плоский



профіль симетричний відносно а-а,  
1,2 - формується



профіль не симетричний, 1,2,3 - формується



профіль не симетричний, 1,2,3 - формується

Рис. 2.3. Узагальнені конструкторні параметри: 1,2 – елементи формоутворення прошивки, 3 - наповнювач



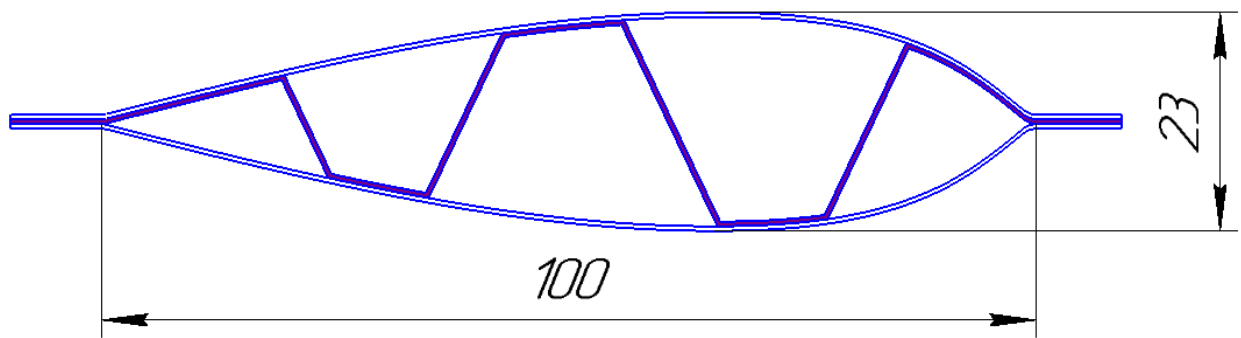


Рис. 2.4. Поперечний переріз фрагменту металевої порожнистої лопатки

Два листа формують корпус, один лист – наповнювач з похилими ребрами жорсткості. Такий тип порожнистої лопатки з титанових сплавів більш технологічний. Фрагмент профілю лопатки симетричний відносно горизонтальної осі, шириною пера 100мм, довжиною 250мм, висота профілю 23мм, відсутня закрутка пера.

## **2.2. Вибір, обґрунтування та проектування дослідного зразка порожнистої лопатки**

Лопатка компресора повинна відповідати таким вимогам, як малому лобовому опору, великій підйомній силі, високій втомній і механічній міцності, ресурсу і надійності, високим вібраційними характеристиками для запобігання виникненню небезпечних резонансних коливань лопаток на робочих режимах двигуна. На лопатку при експлуатації впливають значні знакозмінні і циклічні навантаження, а діючі відцентрові і газові сили викликають великі напруження розтягу, кручення і згину. Мінімальні відхилення геометричних форм і розмірів профілю пера від розрахункових призводить до зменшення ККД компресора, втрати потужності і до зниження економічності двигуна [124].

Одним важливим питанням при створенні конструкції порожнистої лопатки це забезпечення міцності. Конструкція порожнистої лопатки залежить від навантажень (механічних та температурних), які виникають при роботі ГТД. Використання програмних продуктів допомагає спроектувати конструкцію

складної форми та великими габаритами. Аналітично вирішувати задачу складно в наслідок складної геометрії конструкції та граничних умов. Проведення розрахунку на міцність необхідно для встановлювання динамічних характеристик, стійкості до автоколивань, визначення найбільш небезпечного перерізу, діючих навантажень та комплексного проектування геометрії конструкції [66, 73, 127, 40].

У даному розділі представлені чисельні дослідження порожнистої робочої лопатки вентилятора.

Чисельні дослідження стали можливі в результаті використання сучасних засобів обчислювальної техніки, впровадження чисельних методів, в тому числі методу скінченних елементів.

Розрахунковий комплекс ANSYS з використанням математичних моделей високого рівня, дає наочне уявлення про напружено-деформований стан (НДС) об'єкта дослідження, в нашому випадку: широкохордної порожнистої робочої лопатки вентилятора.

У ряді опублікованих статей [167, 74, 119, 120] проводилася чисельна оцінка напружено-деформованого стану порожнистої вентиляторної лопатки з двоякою опуклістю і без закрутки перерізів по радіусу. Треба відзначити, це сильно спрощує створення математичної моделі і дозволяє проводити порівняльний аналіз впливу на напруженість конструкції внутрішньої гофри.

Чисельне дослідження міцності конструкції складається з етапів:

- I) побудова фізичної моделі;
- II) побудова математичної моделі;
- III) метод дослідження математичної моделі;
- IV) аналіз отриманих результатів.

Побудова фізичної моделі включає в собі визначення властивостей конструкції та зовнішніх впливів. Точність результату залежить від вибору характеристик, які визначають роботу вентиляторної лопатки. В якості фізичної моделі взята вентиляторна лопатка діючого ГТД. Для проведення порівняльного аналізу на початку розраховувалася модель вентиляційної лопатки конкретного

профілю, що знаходиться в льотній експлуатації. Отримані результати були прийняті в якості критерію при проведенні подальшого чисельного моделювання (рис. 2.5., 2.6., 2.7., 2.8).

Математична модель досліджується методом кінцевих елементів. Головна ідея методу кінцевих елементів складається в тому, що будь-яку неперервну величину можливо апроксимувати моделлю, яка складається з окремих елементів (ділянок). Апроксимуючі функції найчастіше вибирають в вигляді лінійного, квадратного або кубічного поліному. Конструкція розглядається як сукупність конструкційних елементів, які з'єднанні в вузлових точках [121].

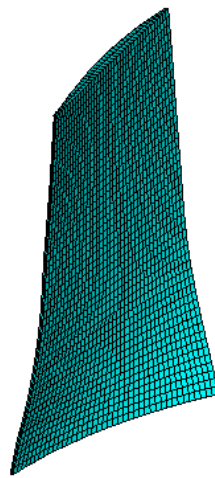


Рис. 2.5. Кінцева-елементна модель пера робочої лопатки

Основні етапи реалізації розрахунку в програмному комплексі ANSYS:

1. Створення геометрії моделі;
2. Розбиття моделі на сітку кінцевих елементів;
3. Прикладання до моделі граничних умов;
4. Чисельне рішення системи рівнянь;
5. Аналіз результатів.

До препроцесорній підготовки належить вибір типу розрахунку, побудова моделі та прикладання навантаження включаючи граничні умови.

Модель виконана відповідно робочим кресленням робочої вентиляторної лопатки. Подальший перехід до моделі порожнистої лопатки здійснювався безпосередньо можливостями розрахункового комплексу ANSYS,

використовуючи з імпортованої обсягу поверхні спинки і корита. Створення математичної моделі плоскої порожнистої лопатки з гофрою виконувалося в системі розрахункового комплексу ANSYS.

Чисельне математичне моделювання передбачає максимальну відповідність моделі до натурному об'єкту. Матеріал вентиляторної лопатки - титановий сплав ВТ6 з механічними властивостями  $E=11500 \text{ кг/мм}^2$ , коефіцієнт Пуассона  $\mu=0.3$ .

При генерації 3-D кінцево-елементної сітки використовувався елемент 2-ої порядку Solid186 (20-ти вузловий гексаедр). Розмір елемента вибирався з умови пропорційності по трьом напрямкам, та визначався розміром товщини профіля суцільної лопатки. При переході до порожнистої лопатки строго дотримувалося збереження густини сітки, тобто постійність розміру кінцевого елемента, з метою можливістю проведення порівняльного аналізу результатів розрахунку варіантів моделей. При генерації кінцево – елементної сітки орієнтувалися виключно на створенні впорядкованої сітки, чому сприяло наявність правильних об'ємів – гексаедрів. При генерації сітки в наповнювачі порожнистої лопатки використовували процедуру Volume Sweep.

Хвостову частину лопатки з математичної моделі виключили, для спрощення. Граничні умови в вигляді закріплення прикладали на кореновому перерізі пера. У перспективі, при налагодженні кінцево-елементної порожнистої моделі пера лопатки, як навантажень можна розглядати робочий тиск на перо, робочу частоту обертання і робоче температурне поле.

Виконувався статичний та модальний аналіз для кожного варіанту математичної моделі. При виконанні модального аналізу виконувалося визначення форм і частот перших 3-х форм власних коливань. Граничні умови у вигляді закріплення прикладали на корневий переріз пера. Робочий розподілений тиск прикладався на поверхню корита пера лопатки. Задавалася робоча частота обертів 610 1/с.

Результати розрахунку по визначенню напружено-деформованого стану пера вихідної суцільної лопатки представлені розподілом радіальних

переміщень (рис. 2.6), радіальних напружень (рис. 2.7.) і еквівалентних напружень (рис. 2.8.).

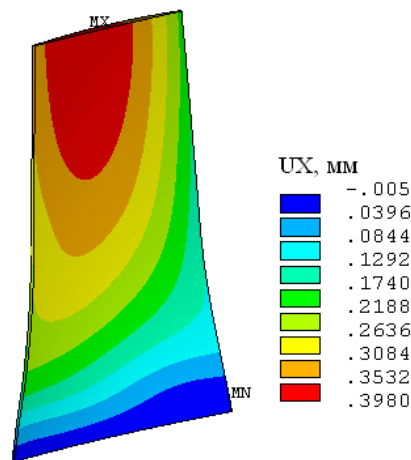


Рис. 2.6. Радіальні переміщення пера робочої лопатки вентилятора

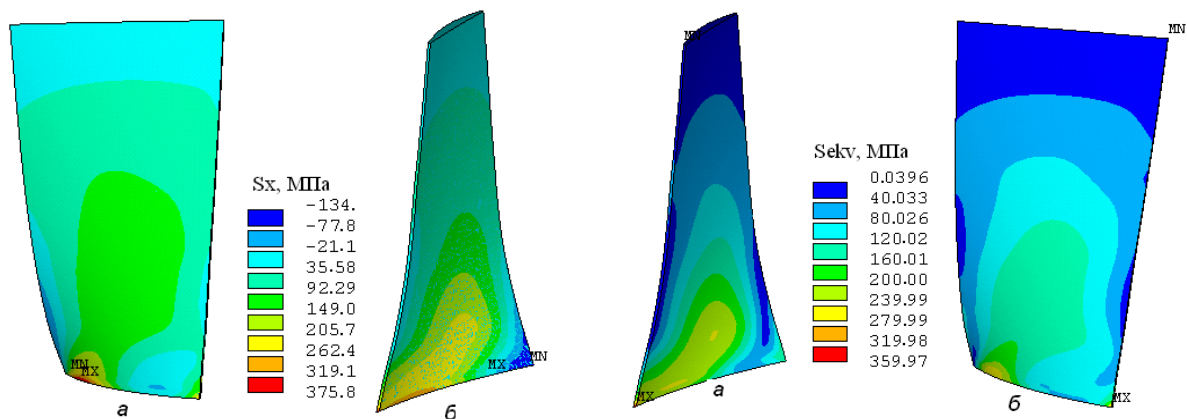


Рис. 2.7. Радіальні напруження пера робочої лопатки вентилятора (а - спинка, б-корито)  
Рис. 2.8. Еквівалентні напруження робочої лопатки вентилятора (а - корито, б - спинка)

Перехід до моделювання порожнистої лопатки здійснено згідно з розробленою технологією. Спинка і корито пера відповідають чинній лопатки. Організовано об'єми і згенерована кінцево-елементна сітка елементом SOLID186, з тієї ж густотою розбивки, як і в працюючій лопатці. На рис. 2.9. наведені об'єми моделі порожнистої лопатки, на рис. 2.10. - кінцево-елементна сітка даної моделі.

Наповнювач, «гофра», максимально наближений по геометрії до профілю пера. Об'єм «гофри» розділений на найпростіші об'єми для полегшення

генерації кінцево-елементної сітки. Труднощі при генерації сітки виникли через сильну закрученність пера лопатки по висоті і зменшенням товщини лопатки зі збільшенням радіуса перерізу лопатки. Якість сітки впливає на результати розрахунку.

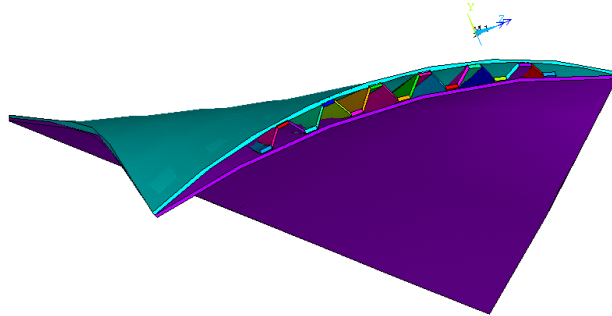


Рис. 2.9. Модель полого пера робочої лопатки вентилятора, об'єми

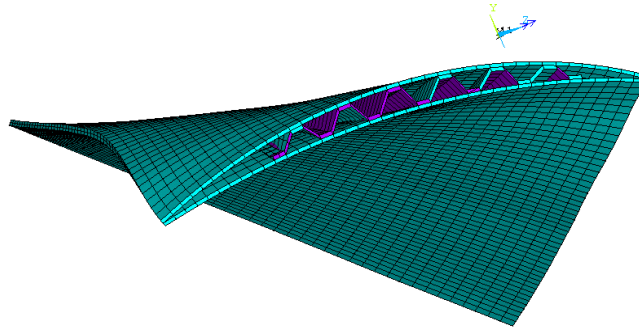


Рис. 2.10. Модель полого пера робочої лопатки вентилятора, кінцева-елементна сітка

Друга проблема створення кінцево-елементної моделі полого пера з «гофрой» - це забезпечення спільної роботи корпусу пера і «гофри». На практиці спільна робота корпусу і «гофри» забезпечується контактним точковим зварюванням. На прикладі чисельного експерименту, тобто розрахунку математичної моделі, можна сказати, що цими операціями (точкового зварювання і наступних технологічних операцій), що забезпечує спільність обшивки і наповнювача, необхідно приділяти підвищену увагу. Інакше деякі складові конструкції працюють самостійно, що неприпустимо. Як моделюванням, так і реальними технологічними процесами забезпечити ідеальну спільність конструкції складно.

Розрахунок моделі пера з наповнювачем - «гофрой» показав що в даному випадку виконане чисельне моделювання недосконале і потребує значного доопрацювання, як і технологічний процес з виготовлення фізичної моделі для експерименту пов'язаний з реальними труднощами. Для оцінки рівня деформацій і напружень було прийнято рішення перейти до формування плоскої порожнистої моделі з «гофрой».

Створено математичну модель плоскої порожнистої лопатки з «гофрой». Розміри моделі відповідають кресленням деталі для виготовлення з подальшим дослідженням. Дана модель значно простіше в чисельному виконанні і в практичному реальному виконанні.

Модель виконується з титанового листа, розмірами 290 x 158 мм. Висота «гофри» прийнята рівною середній товщині реальної лопатки вентилятора (рис. 2.11.).

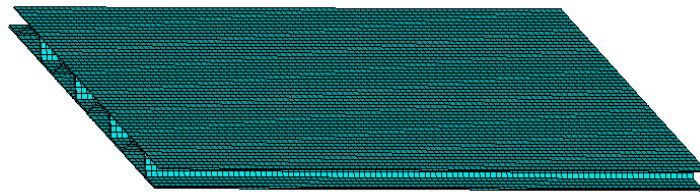


Рис. 2.11. Модель полого порожнистого пера лопатки вентилятора з кінцево-елементної сіткою

Товщина листа 0,6 мм. У математичної моделі виконана умовно точкове зварювання «гофри» і листа. Якість зварювання на реальній моделі вимагає особливої уваги і ретельного виконання. Розрахункова модель показана на рис. 2.12

По нижній кромці моделі (кореневий переріз лопатки) організовано закріплення моделі в усіх напрямках, імітуючи закріплення реальної моделі в затискачі. По верхній кромці, відповідно периферійному перерізу лопатки, прикладена контурне навантаження розтягування ( $\sigma_{\text{конт}} = 230 \text{ МПа}$ ). Дане навантаження відтворює діючу центробіжну силу в полі обертання лопатки з

частотою  $n = 6020$  об/хв. На площу, яка відповідає кориту лопатки прикладено розподілений тиск від впливу повітряного потоку. Поле тиску відповідає реальній робочій лопатки вентилятора (0,004 ... 0,014 МПа).

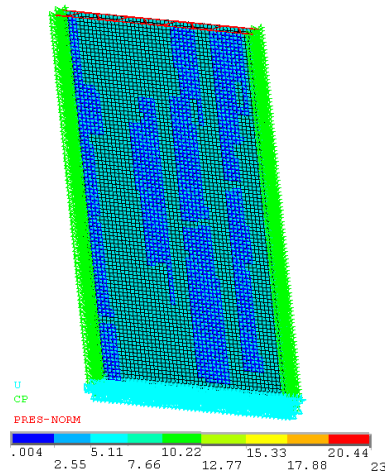


Рис. 2.12. Розрахункова модель порожнистої плоского пера

Для оцінки НДС моделі виконані статичний і динамічний аналіз математичної моделі програмним розрахунковим комплексом ANSYS. Результати статичного аналізу представлені у вигляді розподілу переміщень, радіальних, згинаючих, дотичних (від кручення) і еквівалентних напружень (рис. 2.13-2.16)

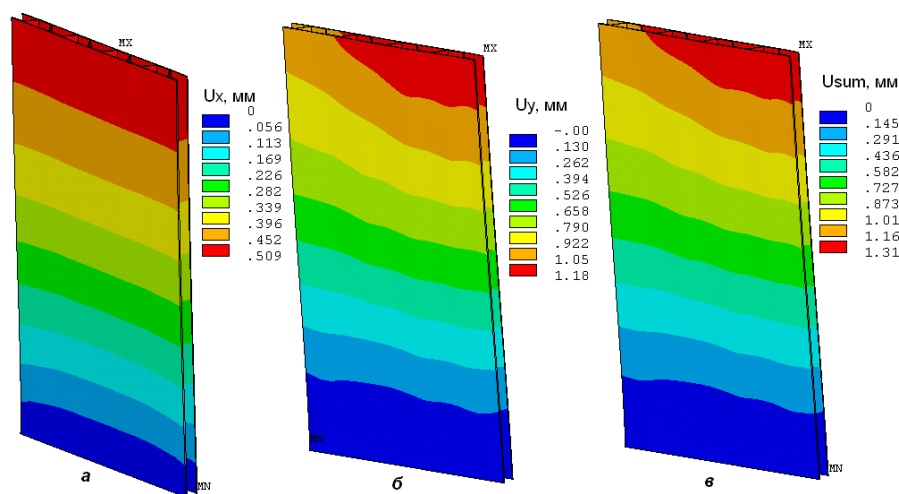


Рис. 2.13. Розподіл радіальних (а), осьових (б) і сумарних переміщень (в) пера порожнистої плоскою моделі з «гофрой»



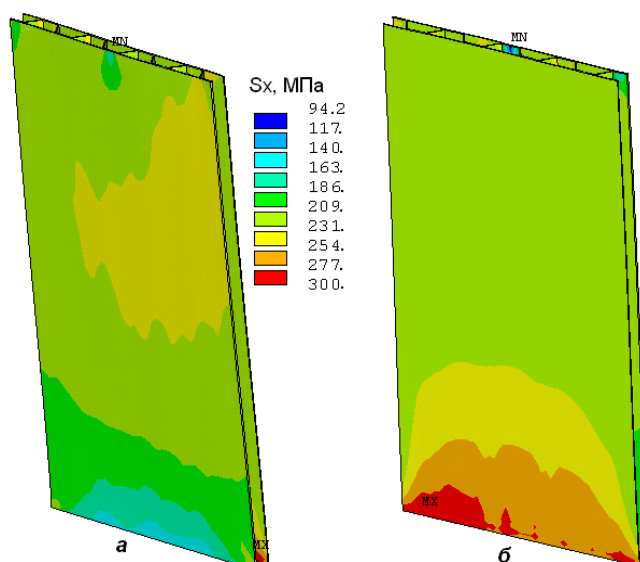


Рис. 2.14. Розподіл радіальних напружень пера порожнистої плоскою моделі з «гофрой», де: а-спинка моделі пера, б - корито моделі пера з доданим тиском по поверхні

Несиметричність розподілу напружень на «кориті» і «спинці» моделі плоскої лопатки можна пояснити різною жорсткістю пластин, отриманої від несиметричного взаємодії пластин з «гофрой».

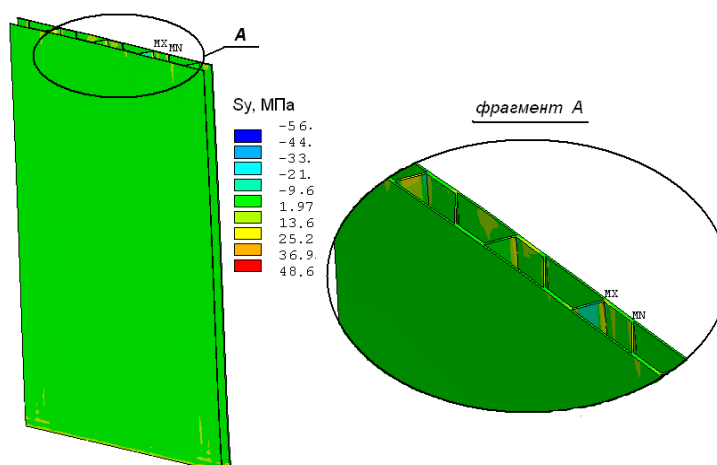


Рис. 2.15. Розподіл осьових напружень пера порожнистої плоскою моделі з «гофрой»

Величини осьових напружень незначні, - як наслідок прикладеного на поверхню корита тиску. Можна помітити, що вигин сприймає «гофра», тоді як пластини корита і спинки не навантажені.

Дотичні напруження від кручення внаслідок нерівномірного тиску на перо, і еквівалентні напруження показані на рис. 2.16, 2.17.

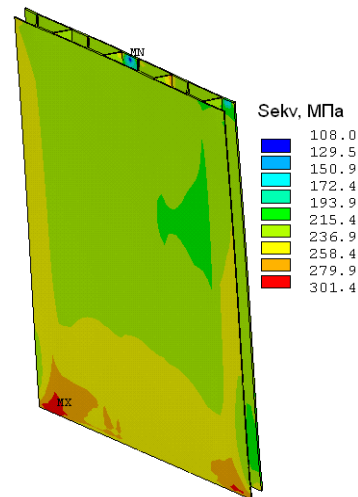
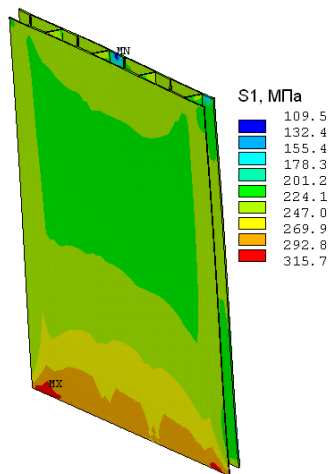


Рис. 2.16. Дотичні напруження пера порожнистої плоскою моделі

Рис. 2.17 Еквівалентні напруження пера порожнистої плоскою моделі

Рівень напружень в моделі плоскої порожнистої лопатки від прикладених навантажень невисокий, нижче, ніж в суцільній робочій лопатки (рис. 2.18).

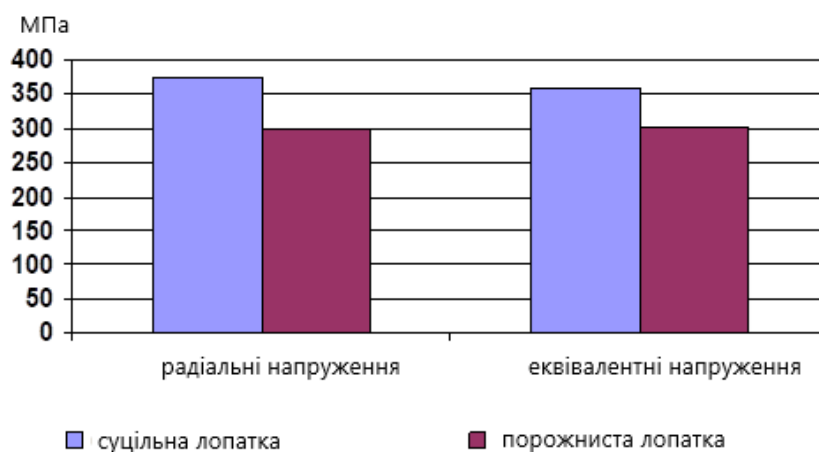


Рис. 2.18. Порівняльний аналіз рівня напружень вихідної і плоскої порожнистої лопаток

Математичне моделювання дає можливість візуально оцінити прогнозоване напружено-деформований стан «гофри» (рис. 2.19).

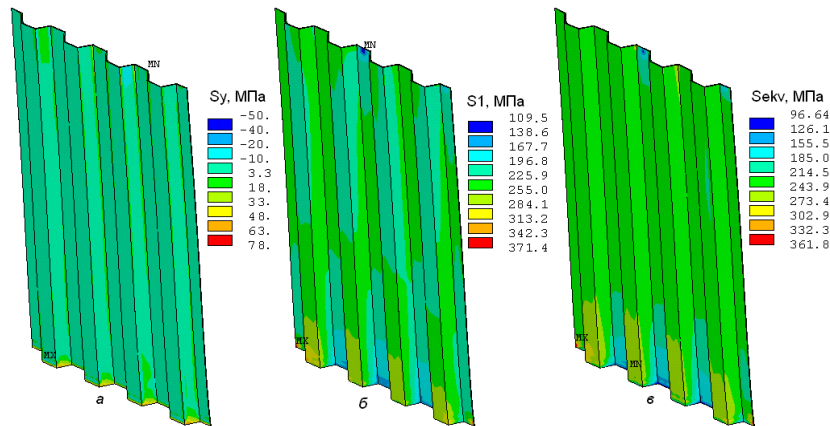


Рис. 2.19. Осьові (а), дотичні (б) і еквівалентні напруження (в) в наповнювачі пера фрагменту порожнистої лопатки, в «гофри»

Виконаний модальний аналіз моделі пера порожнистої плоскою лопатки визначив форми і частоти власних коливань (рис. 2.20).

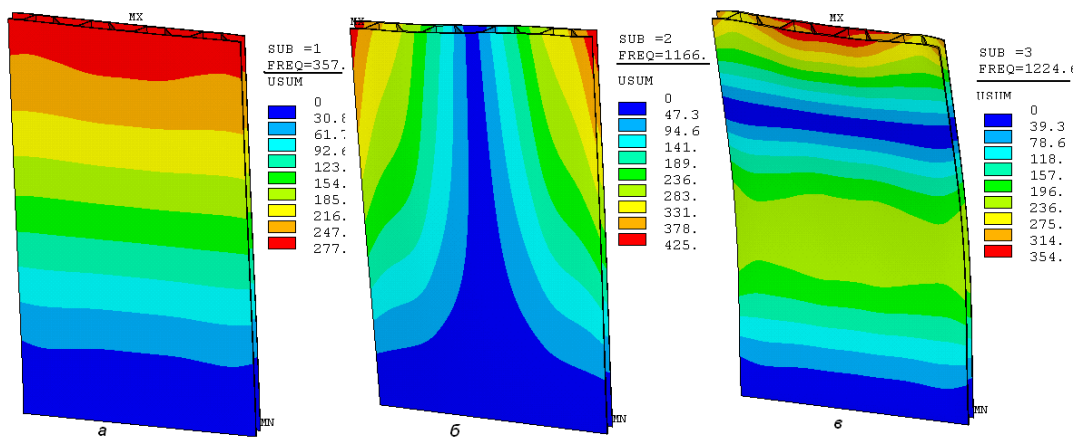


Рис. 2.20. Три перші форми і частоти власних коливань плоскої порожнистої лопатки вентилятора (а- 1-ша згинальна, б - 1-ша крутильна, в- 2-а згинальна)

Для порівняння наводимо частоти і форми власних коливань суцільної лопатки вентилятора (рис. 2.21)

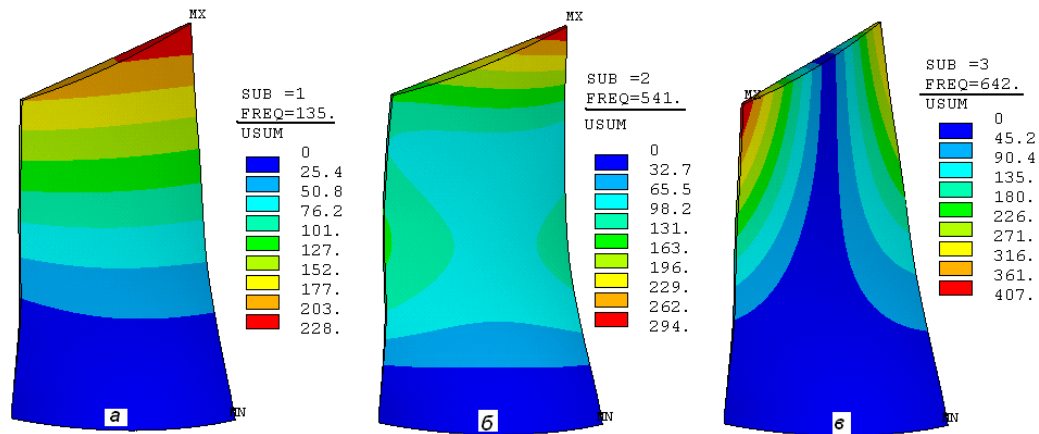


Рис. 2.21. Три перші форми і частоти власних коливань суцільної лопатки вентилятора (а- 1-ша згинальна, б -2-га згинальна, в -1-а крутильна)

Рівень напружень в порожнистій лопатки нижче ніж в вихідної. Напруження в кореновому перерізі обумовлені відцентровою силою лопатки в умовах обертання з частотою ротора. Величина відцентрової сили прямо пропорційне масі лопатки. Тому напруження в вихідної лопатки, маса якої більша маси порожнистої лопатки будуть вищі напружень порожнистої лопатки, це показує розрахунок. Перехід на порожнисту лопатку обумовлено прагненням знизити рівень напружень відповідальної деталі ГТД.

Для визначення опору втомі лопаток рівень змін напружень в них повинен бути достатньо низким. Підвищення змін напружень виникають в лопатках на резонансних режимах, коли частоти зовнішніх збуджуючих сил співпадають з однією з власних частот коливань лопатки. Практичне значення мають частоти від 1000-1500 Гц. На стадії проектування важливо визначити власні частоти коливань лопаток, особливо першу (нижчу) частоту згинальних коливань, яка пов'язана з деформацією лопатки відносно осі мінімальної жорсткості [122]. При обертанні на вентиляторну лопатку діють відцентрові сили, які створюють розтягнення лопатки, цим підвищують частоту власних коливань.

Модальний аналіз показує, що у пера порожнистої плоскої моделі лопатки вентилятора частоти 3-х перших форм власних коливань значно вище, ніж у пера вихідної суцільної лопатки вентилятора.

На графіку (рис. 2.22) представлена резонансна діаграма для пера суцільної лопатки вентилятора і плоскої порожнистої моделі лопатки вентилятора. Діаграма Кемпбелла відображає залежність власних частот коливань робочої лопатки та частот збуджуючих гармонік від частоти обертання ротора та дозволяє знаходити режими роботи двигуна, на яких проходять резонанси коливання. Дозволяє знаходити режими роботи, на яких відбуваються резонанси коливання.

Вертикальні вісь на діаграмі резонансу це динамічна частота власних коливань лопатки, що обертається (розмірність в Гц). Величина власних частот визначається математичним моделювання за формулою для слабо закрученої лопатки:

$$f_{дин} = \sqrt{f_c^2 + Bn_c^2} \quad (2.1)$$

де  $f_c$  - частота лопатки, що не обертається,  $B$  - коефіцієнт, залежить від форми прогиба,  $n_c$  - частота обертання ротора, об/с.

Величини власних частот визначаєм математичним моделюванням.

Горизонтальна вісь це діапазон робочих частот обертання ротора. Робочі частоти обертання ротора  $n_c$  відповідає зоні від обертання малого газу  $n_{мг}$  до максимальних обертів  $n_{max}$ . Максимальна тривалість – режим польоту літака, коли сам набрав швидкість та летить до пункту призначення. Крейсерський режим – режим польоту літака з постійною швидкістю. Основний політ на дальність та являється режимом сталого горизонтального польоту.

Горизонтальний графік це графік динамічних власних частот лопаток порожнистої та суцільної.

Похилі графіки -частоти коливань гармонік збуджуючих сил, які описуються рівнянь:

$$f_g = K \cdot n_c, \quad (2.2)$$

де  $K$  - порядок гармонік збуджуючих сил, які на графіку дорівнюють тангенсу кута нахилу прямої.

Точки перетину лучей з кривою змін  $f_{\text{дин}} = f(n_c)$  дають резонансні частоти обертання ротора. Наявність резонансів в робочій зоні небажано.

Аналіз резонансної діаграми показує, що резонанс по першій формі коливань фрагмента суцільної лопатки відбувається на низьких частотах обертів ( $\approx 4000$  об / хв), тоді як порожниста плоска лопатка має 2 резонансу по першій формі коливань, практично в робочому діапазоні частот обертання від 4-ої і 5-ої гармонік.

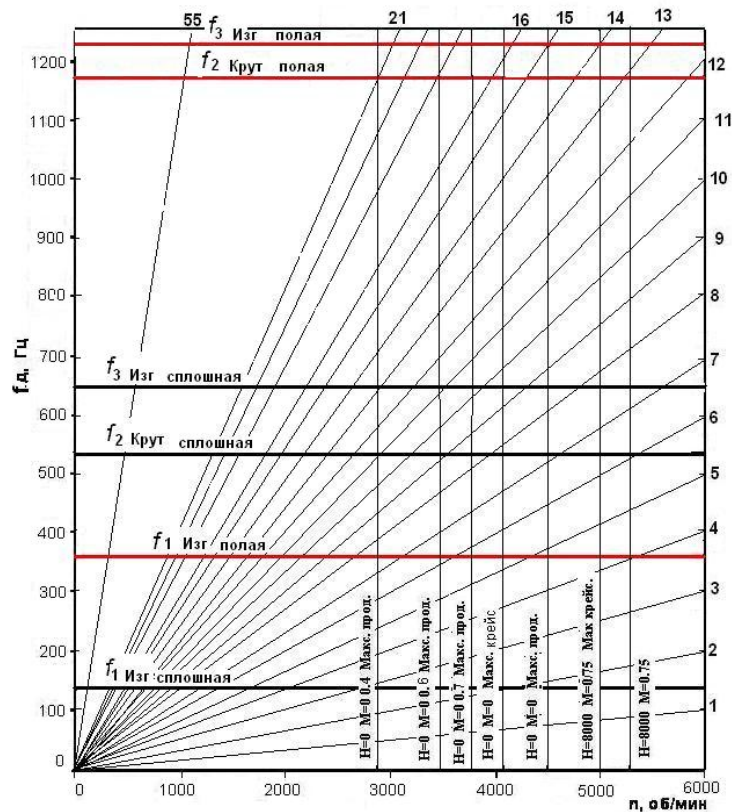


Рис. 2.22. Діаграма Кемпбелла (резонансна діаграма) фрагмента суцільної вентиляторної лопатки і моделі порожнистої плоскої лопатки вентилятора

На діаграмі Кемпбелла  $H$  - висота польоту літака, яка вимірюється в км, в нашому розрахунку результати отримані на землі, тобто  $H=0$ .  $M$  - це число

Маха, яке враховує вплив аеродинаміки надзвуку. Тобто,  $M = V/a$ , де  $V$  - швидкість літака,  $a$  - швидкість звуку. Число  $M$  враховує зміну параметрів повітряного середовища через швидкість звуку, тобто в скільки разів швидкість літака більша або менша швидкості звуку. Якщо  $M = 0$ , то швидкість літака дорівнює 0, якщо  $M = 0.4$ , то швидкість літака дорівнює  $0.4 \cdot a$ .

Фрагмент суцільної лопатки має резонанси по другій формі коливань в робочому діапазоні частот обертання від 6-ої, 7-ої і 8-ої гармонік, а порожниста плоска лопатка має резонанси по 2-й і 3-ій формам коливань від 12 ... 16 -й гармонік. Спостерігається необхідність проведення натурного дослідження з тензометрирования.

Величина частот власних коливань об'єкта визначається геометрією об'єкта та матеріалом об'єкта. На величини власних коливань впливає зміна профіля лопатки. Головне щоб зміна геометрії лопатки привела до великого стискування повітря. Порядок величин 3-х перших частот власних коливань типовий для даної вентиляторної лопатки. Величини частот низькі і забезпечують відсутність резонансу в робочому діапазоні частот обертання ротора. Різниця в величинах частот власних коливань вихідної лопатки та порожнистої обумовлена різницею в геометрії.

### **2.3. Структура технологічного процесу отримання порожнистої лопатки**

На основі розрахунків була вибрана конструкція порожнистої лопатки. Поперечний переріз лопатки представлено на рис. 2.4. Відпрацювання технології отримання типового перерізу ґрунтується на отриманні порожнистої лопатки обмеженої довжини експериментально.

Одним з методів отримання великогабаритних лопаток сучасних газотурбінних двигунів є виконання лопаток вентилятора порожнистими. Технологія виготовлення пустотілих лопаток ґрунтується на поєднанні двох процесів зварювання під тиском і формування в режимі надпластичності. У

пропонованому способі вирішуються як технологічні, так і експлуатаційні завдання.

В якості листового матеріалу, для виготовлення лопатки, використовувати титановий сплав - ОТ4-0. Для отримання вихідних заготовок з розміром зерна на порядок менше, промисловий лист піддають додатковій деформації прокаткою. Подрібнення зерна забезпечить активний перебіг процесу зернограничного проковзування при формоутворенні, та знизить кількість дефектів в зонах з'єднання обшивки з наповнювачем. З промислового листа товщиною 0,5 мм вирізують три заготовки: дві для обшивки і одну для наповнювача.

Наведена нижча структура технологічного процесу виготовлення порожнистої лопатки вентилятора полягає в наступному (рис. 2.23.):

1. Нанести захисне покриття нітрид бора на поверхні ділянок заготовок обшивок і наповнювача, які не повинені дифузійно зварюватися, використовуючи трафарет;
2. Ділянки які піддаються дифузійному з'єднанню механічно зачистити;
3. Зібрати заготовки обшивок і наповнювача, штуцер в пакет;
4. Герметизувати пакет по кромкам;
5. Нагріти пакет до температури дифузійного зварювання і здійснити з'єднання заготовок;
6. Надати цільній конструкційній заготовки, отриманої після дифузійного зварювання шляхом нагрівання до температури надпластичного формування, аеродинамічний профіль з формуванням корита спинки лопатки;
7. Подати в порожнину формоутворення установки робоче середовище для створення тиску, необхідного для надпластичного формування;
8. Здійснити надпластичне формування до отримання порожнистого пера лопатки і формування ребер жорсткості;
9. Зміцнення поверхневого шару лопатки методом поверхневого пластичного деформування - сталевими кульками в поле потужного ультразвуку;
10. Контроль якості.



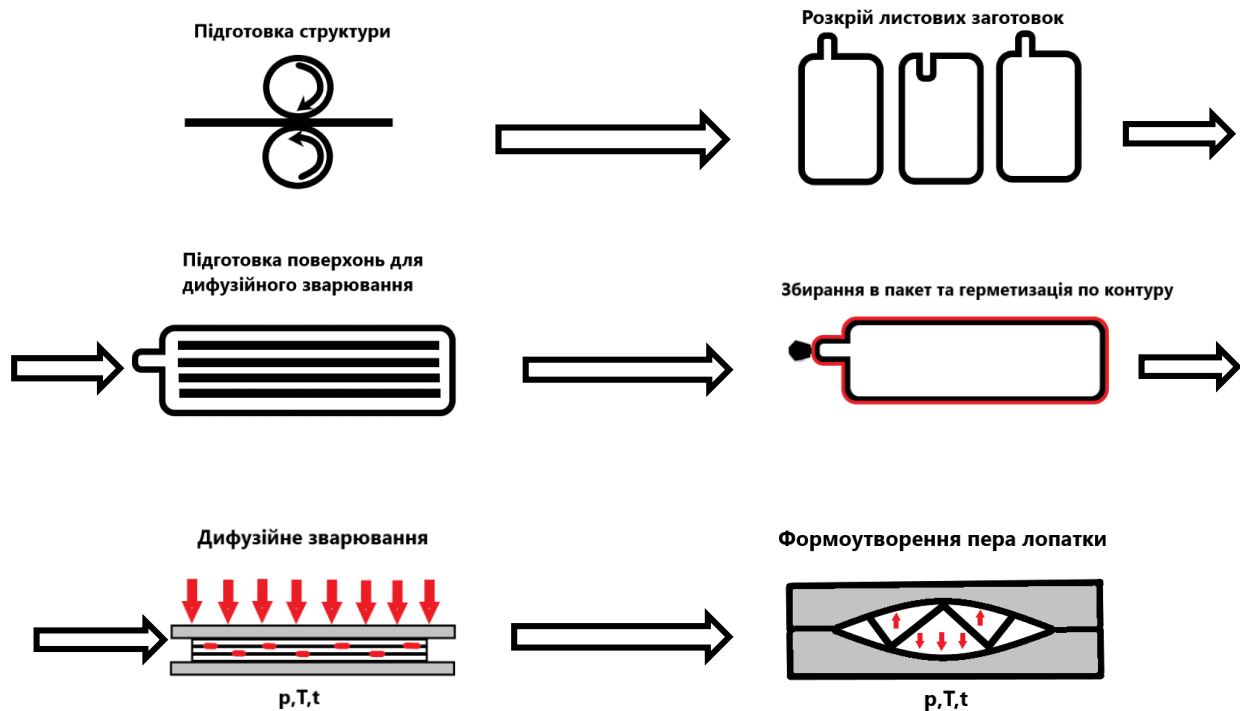


Рис. 2.23. Структурна схема виготовлення порожнистих лопаток

#### 2.4. Проектування оснащення для виготовлення фрагменту порожнистої лопатки

Спроековано пристрій УГФ-002.00.000 призначений для дослідження деформування елементів порожнистої лопатки (рис. 2.24). На рис. 2.25 наведено креслення заготовки для формоутворення фрагменту порожнистої лопатки.

Заготовки складаються з двох або трьох листів (поз. 1; 2; 3) та штуцера (поз. 4.), зварених по контуру. Заготовка збірна з штуцером (поз. 1 та поз. 4) розміщується між матрицями поз. 7 та поз. 8, які приймають участь у формуванні зовнішньої поверхні лопаток, та між втулками поз. 8. Колонки направляючі (поз. 9) служать для правильної орієнтації друг відносно друга матриць (поз. 7 та 8). Все це міцно фіксується болтами (поз. 10) та гайками з шайбами (поз. 15 та 16). Необхідність напіввтулок (поз. 8) обумовлено різною товщиною заготовок (поз. 1) та різним зовнішнім радіусом в заготовках в зоні штуцера. Креслення напіввтулок зображене на рис. 2.26, зображення матриць – на рис. 2.27. В матрицях є отвори для виходу повітря. Для укладання пристрою в піч можливо вкрутити в бокові різьбові отвори матриць гвинти або болти. При ускладненні

роз'єднання матриць після нагріву, в верхній матриці передбачено 4 технологічних різьбових отвори.

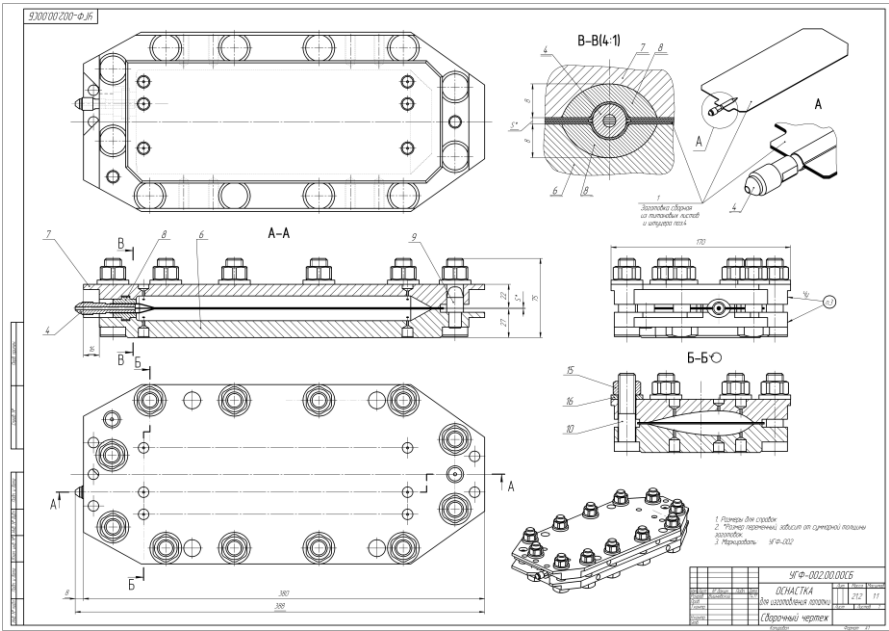


Рис. 2.24. Пристрій УГФ-002.00.000 для дослідження деформування елементів порожнистої лопатки: 1 – заготовка збірна з штуцером 4; 6 – матриця нижня; 7 – матриця верхня; 8 – напіввтулка (в залежності від товщини заготовки має різне виготовлення); 9 – дві колонки направляючі; 10 – болт; 15 – гайка; 16 – шайба

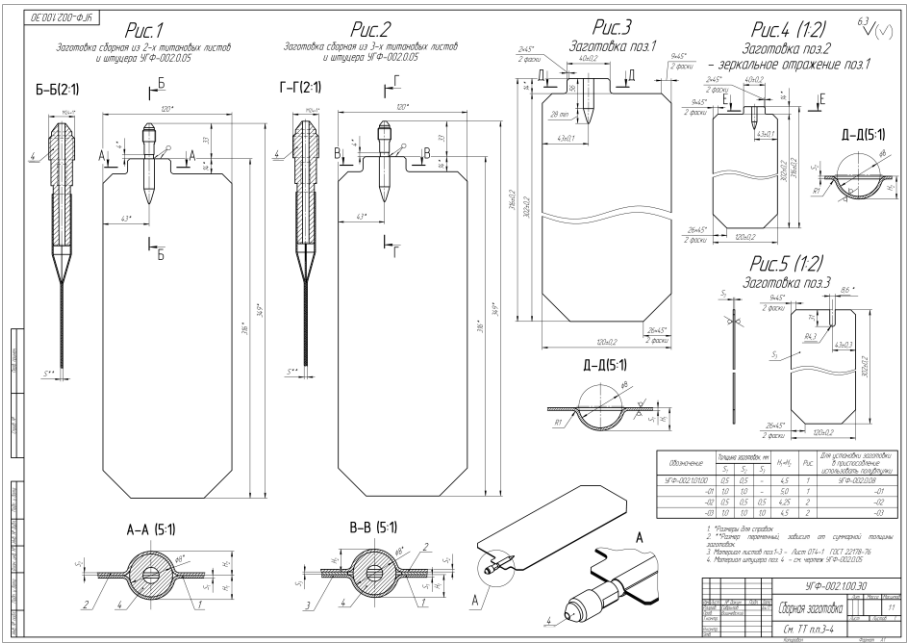


Рис. 2.25. Заготовки для дослідження деформування елементів порожнистої лопатки

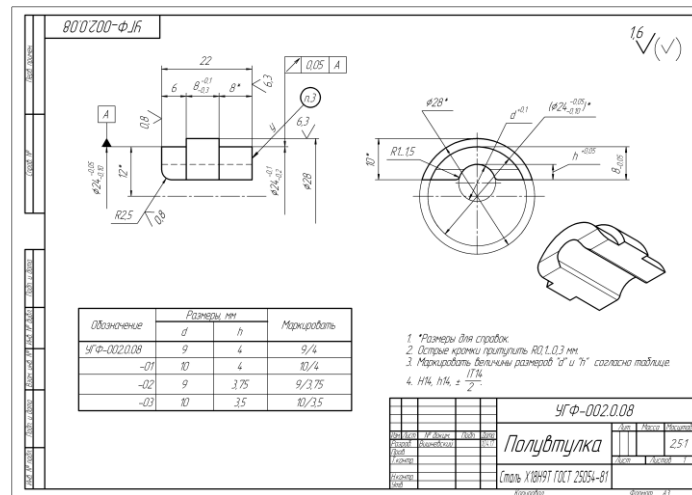
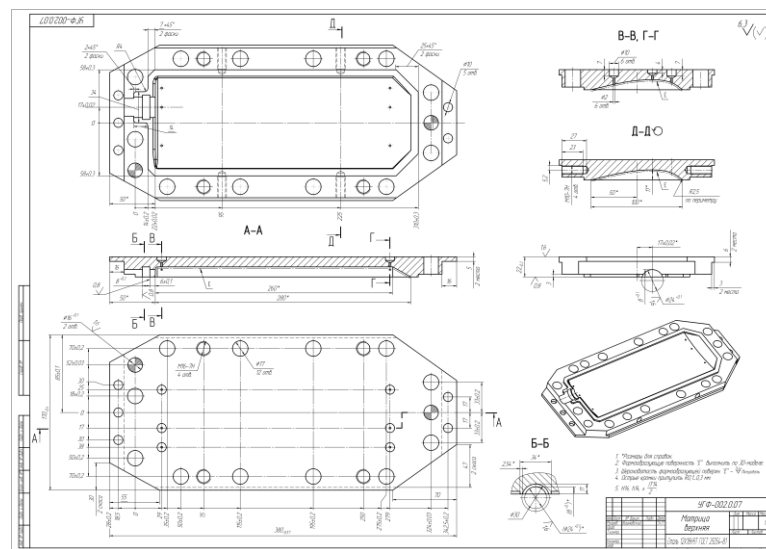
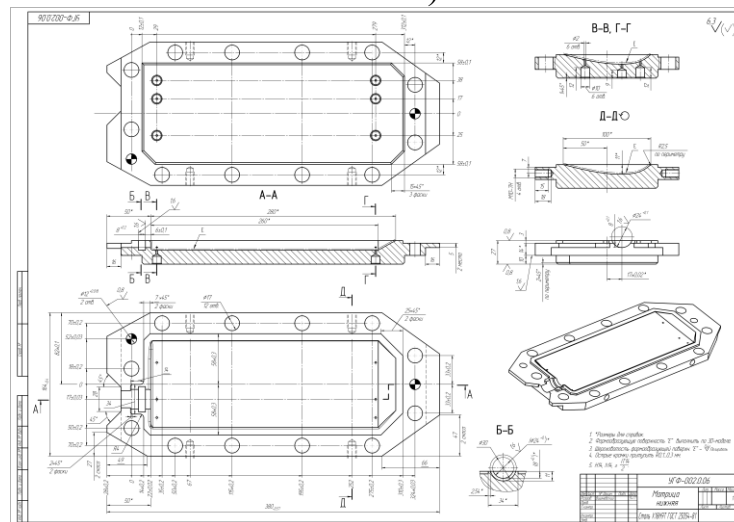


Рис. 2.26. Креслення напіввтулки



a)



6)

Рис. 2.27. Матриці пристрою для дослідження деформування елементів порожнистої лопатки: а – верхня матриця; б – нижня матриця

Заготовка в пристрої УГФ-002.00.000 розташовується в пічці на нагрівається до певної температури. Через штуцер подається під тиском газ аргон, в результаті чого формується порожниста лопатка. Середній лист (поз. 3) формує перегородки.

## **2.5. Висновки по розділу 2**

1. На основі узагальнення етапів еволюції конструкцій вентиляторної лопатки розроблено конструкторсько – технологічний класифікатор технічних рішень конструкції лопатки вентилятора ГТД. Розроблений класифікатор дає взаємозв'язок схем поперечного перерізу лопаток з основними конструктивними параметрами. Показано, що максимальну ефективність зниження маси конструкції мають порожнисті лопатки з листовим наповнювачем (4 клас).

2. Встановлено, що порожнисті металеві лопатки комірчастого типу більш складніші в технологічному аспекті та мають більшу масу, ніж лопатки гофрового типу. На підставі цього вибрана конструкція металевої порожнистої лопатки з гофровим типом наповнювача.

3. Для відпрацювання технології запропоновано конструкцію фрагменту порожнистої металевої лопатки вентилятора гофрового типу. Встановлено, що конфігурація гофрового наповнювача залежить від ширини з'єднання наповнювача з обшивкою та відстанню між зонами з'єднання. Була прийнята спрощена форма фрагменту металевої порожнистої лопатки гофрового типу, яка складається з трьох титанових листів. Фрагмент профілю лопатки має симетричний відносно головних осей поперечний переріз і постійну форму перерізу у напрямку поздовжньої осі. При цьому геометричні розміри фрагменту лопатки складають: ширина пера 100мм, довжина 250мм, висота профіля 23мм.

4. Створена математична модель і проведено чисельне дослідження фрагменту пера порожнистої лопатки з використанням комп'ютерної системи CAD/CAE ANSYS. Проведено порівняльний аналіз з моделлю елементу регулярного профілю поперечного перерізу вентиляційної лопатки, що знаходиться в льотній експлуатації. Хвостову частину лопатки з математичної моделі виключили, для спрощення.

Доведено, що порожниста металева лопатка вентилятора гофрового типу при роботі витримує великі статичні, вібраційні та температурні напруження, наповнювач виконує роль демпфера коливань. Проведений статичний та модальний аналіз для кожного варіанту математичної моделі показав, що рівень напружень в моделі порожнистої лопатки від прикладених навантажень нижче, ніж в суцільній робочій лопатці вентилятора. Показано також, що радіальні та еквівалентні напруження від інерційних сил при обертанні лопаток на 10-15% нижче для порожнистих лопаток.

5. Запропонована структура технологічного процесу виготовлення порожнистих лопаток, яка включає операції нанесення захисного покриття на поверхні заготовок, збирання заготовок в пакет, герметизування пакета по кромкам, зварювання під тиском та формоутворення пера лопатки в ізотермічних умовах.

6. Спроековано пристрій для формоутворення фрагменту порожнистої лопатки.

### **3. Методика досліджень**

#### **3.1. Узагальнена методика досліджень дисертаційної роботи**

На рис. 3.1. наведена структурна схема узагальненої методики досліджень в дисертації.

Узагальнена методика досліджень процесу пластичного формоутворення порожнистих лопаток з титанових сплавів для газотурбінних двигунів згідно наукової ідеї базується на визначенні особливостей та параметрів процесу в'язкопластичного формоутворення фрагменту порожнистої лопатки регулярного перерізу обмеженої довжини з листових титанових сплавів. Визначення параметрів процесу в'язкопластичного формоутворення фрагменту порожнистої лопатки в роботі досягається шляхом порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

Теоретичний аналіз базується на чисельному моделюванні процесу в'язкопластичного формоутворення методом скінчених елементів з використанням CAD/CAE DEFORM та QFORM.

Для забезпечення точності розрахунку в роботі розроблено експериментально-аналітичний метод визначення в'язкопластичної моделі матеріалу, що деформується, на основі випробувань на чистий згин при температурно-швидкісних умовах, які відповідають процесу формоутворення фрагменту лопатки.

Враховуючи, що в процесі формоутворення порожнистої лопатки виникають великі пластичні деформації, в роботі вирішується питання щодо визначення границі деформівності титанового сплаву для відповідних температурно-швидкісних умов ізотермічного процесу та схеми напруженого стану.

Визначення граничного значення деформівності листів титанових сплавів методично виконується експериментально на основі випробувань при формоутворенні мембрани з відповідного листового матеріалу газовим середовищем в ізотермічних умовах з врахуванням температурно-швидкісного фактору.

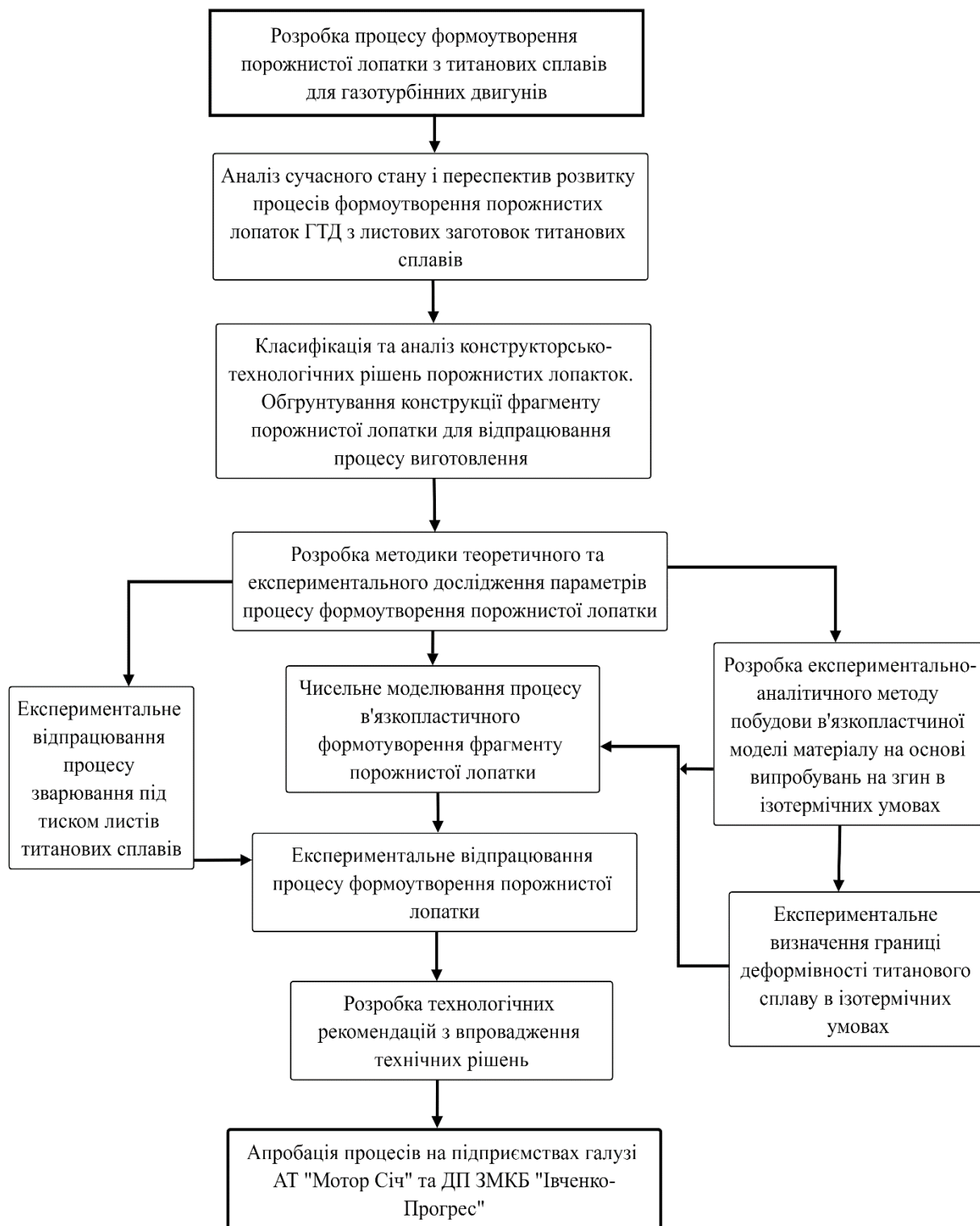


Рис. 3.1. Структурна схема методики досліджень в дисертації

Одною з основних операцій комплексного процесу виготовлення фрагменту порожнистої лопатки є операція дифузійного зварювання під тиском заготовок титанових сплавів в пакеті. Експериментальне відпрацювання режимів

процесу зварювання під тиском листів титанових сплавів методично виконано на плоских зразках з дослідженням міцності та структури зварного з'єднання. Отримані результати, що відповідають умовам з'єднання листів в пакеті заготовок, використані при експериментальному відпрацьованому процесу формоутворення фрагменту порожнистої лопатки.

На основі чисельного моделювання процесу пластичного формоутворення фрагменту порожнистої лопатки з урахуванням моделі матеріалу, що деформується, для відповідних температурно-швидкісних умов деформування і граничних можливостей сталого деформування матеріалу, а також результатів експериментального відпрацювання процесу в дисертації виконана розробка технічних рішень при виготовленні натурних порожнистих лопаток на підприємствах галузі.

### **3.2. Методика теоретичних досліджень**

Для визначення параметрів напруженого та деформованого стану мембрани і фрагменту порожнистої лопатки з титанових сплавів в ізотермічних умовах гарячої пластичної деформації газовим середовищем використана замкнута система рівнянь механіки суцільних середовищ [168, 169], яка забезпечує високу точність розрахунку параметрів деформування для великих пластичних деформацій.

При аналізі процесів в'язкопластичного деформування приймаємо такі припущення:

- о справедливості закону постійності об'єму в осередку деформацій;
- вважаємо, що зміцнення металу при деформуванні при температурах гарячої пластичної деформації не залежить від ступеня деформації, а залежить від температури деформації;
- вважаємо також, що зміцнення металу є чутливим для швидкісного фактору деформацій – швидкості деформацій;
- вважаємо, що зміцнення металу не залежить від виду напружено-деформованого стану (показника напруженого стану);



- справедлива гіпотеза єдиної кривої зміцнення.

Таким чином метал має в'язкопластичні властивості, які описуються наступною залежністю:

$$\sigma_i = f(\varepsilon_i, T) \quad (3.1)$$

де  $\sigma_i$  - інтенсивність напружень;

$\varepsilon_i$  - інтенсивність швидкостей деформацій;

$T$  - температура заготовки в процесі деформування.

Якщо температура процесу формоутворення заготовок постійна  $T = const$ , що характерно для ізотермічних процесів, то (3.1) приймає вигляд:

$$\sigma_i = f(\varepsilon_i), \text{ при } T = const \quad (3.2)$$

Функція (3.2.) представляє собою модель деформуемого в'язкопластичного матеріалу, константи якої отримують на основі експериментів.

Модель матеріалу в подальшому використовується при чисельних розрахунках, а також в основному фізичному законі при аналітичному рішенні:

$$\bar{D}_\sigma = \bar{D}_\varepsilon, \quad (3.3.)$$

де  $\bar{D}_\sigma$  та  $\bar{D}_\varepsilon$  - направляючі тензори, відповідно, напружень і швидкостей деформацій.

Або в скалярному вигляді дівіатори напружень та швидкостей деформацій зв'язані залежністю

$$D_\sigma = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} D_\varepsilon \quad (3.4.)$$

Встановлений зв'язок між дівіаторами напружень і швидкостей деформацій дозволяє розрахувати основні технологічні параметри процесу деформування, якщо заданий закон руху часток матеріалу при деформуванні та визначено механічні властивості металів [168].

Процес деформування можна описати чотиривимірним вектором швидкості переміщення часток металу в циліндричній системі координат:

$$\vec{V}_0 = V_r \vec{i} + V_\varphi \vec{j} + V_z \vec{k} + V_t \vec{n} \quad (3.5)$$

Складові вектора швидкості  $V_r, V_\varphi, V_z$  є функціями чотирьох змінних  $r, \varphi, z, t$ . На підставі умови одночасного представлення деформованого тіла, складова вектора швидкості  $V_t$  не залежить від координат, а для виконання закону постійності об'єму ця складова не повинна залежати від часу. Таким чином, для процесів пластичного деформування  $V_t$  є постійною величиною.

Складові вектора швидкостей переміщень задаються аналітично як функції координат на підставі експериментально встановлених кінематичних закономірностей процесу течії металу заготовки при її формозміні. В загальному вигляді для циліндричної системи координат можна записати:

$$\begin{aligned} V_r &= V_r(r, \varphi, z, t), \\ V_\varphi &= V_\varphi(r, \varphi, z, t), \\ V_z &= V_z(r, \varphi, z, t), \\ V_t &= \text{const.} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Складові вектора швидкості переміщень в силу закону постійності об'єму при деформуванні в векторному вигляді зв'язані співвідношенням:

$$\text{div} \vec{V}_0 = 0. \quad (3.7)$$

Визначення параметрів деформованого стану та роботи деформування проводиться відповідно відомим залежностям [168,169].

Наведемо основні співвідношення, які будуть використані в подальшому розрахунку (у циліндричній системі координат).

Компоненти тензора швидкостей деформацій:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \frac{\partial V_r}{\partial r}; & \varepsilon_{r\varphi} &= \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r}; \\ \varepsilon_{\varphi\varphi} &= \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{V_r}{r}; & \varepsilon_{\varphi z} &= \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \varphi}; \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial V_z}{\partial z}; & \varepsilon_{zr} &= \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Компоненти тензора деформацій

$$e_{ij} = \int_t \varepsilon_{ij} dt. \quad (3.9)$$

Інтенсивність швидкостей деформацій та деформацій визначаються залежностями:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[ (\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi\varphi})^2 + (\varepsilon_{\varphi\varphi} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{rr})^2 + \frac{3}{2} (\varepsilon_{r\varphi}^2 + \varepsilon_{\varphi z}^2 + \varepsilon_{zr}^2) \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (3.10)$$

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[ (e_{rr} - e_{\varphi\varphi})^2 + (e_{\varphi\varphi} - e_{zz})^2 + (e_{zz} - e_{rr})^2 + \frac{3}{2} (e_{r\varphi}^2 + e_{\varphi z}^2 + e_{zr}^2) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.11)$$

Функція розподілу дисіпації повної енергії в матеріалі заготовки при її деформації, в процесі якого заготовка змінює свою початкову форму від початкової до кінцевої, записується у вигляді:

$$E_0 = \sigma_i \varepsilon_i. \quad (3.12)$$

Повна робота щодо зміни форми визначається інтегруванням по об'єму  $W$  та часу деформування  $t$  функції розподілу повної енергії:

$$A_0 = \int_t \int_W E_0 dw dt. \quad (3.13)$$

Складові тензору напружень визначаються рівняннями:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \sigma + 2\mu\varepsilon_{rr}; & \tau_{r\varphi} &= \mu\varepsilon_{r\varphi}; \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= \sigma + 2\mu\varepsilon_{\varphi\varphi}; & \tau_{\varphi z} &= \mu\varepsilon_{\varphi z}; \\ \sigma_{zz} &= \sigma + 2\mu\varepsilon_{zz}; & \tau_{zr} &= \mu\varepsilon_{zr}. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Величина середнього напруження в (3.14) визначається системою універсальних рівнянь, які в циліндричних координатах мають вигляд [168]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial r} &= -\mu \left( \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{V_r}{r^2} \right) - \\ &- 2 \frac{\partial \mu}{\partial r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \mu}{\partial \varphi} \left( \frac{1}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r^2} \right) - \frac{\partial \mu}{\partial z} \left( \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right); \\ \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma}{\partial \varphi} &= \mu \left( \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} - \frac{V_\varphi}{r^2} \right) - \\ &- \frac{\partial \mu}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial \mu}{\partial \varphi} \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{\partial \mu}{\partial z} \left( \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right); \\ \frac{\partial \sigma}{\partial z} &= \mu \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) - \frac{\partial \mu}{\partial r} \left( \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) - \\ &- \frac{1}{r} \frac{\partial \mu}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial V_z}{\partial \varphi} \right) - 2 \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial V_z}{\partial z}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Наведений теоретичний підхід використано при аналізі процесу чистого циліндричного згину листової заготовки в розробленому експериментально-аналітичному методі визначення моделі матеріалу.

### **3.3. Методика експериментальних досліджень**

#### **3.3.1. Методика формоутворення мембрани з листового матеріалу в ізотермічних умовах**

Метою випробувань є дослідження формоутворення мембрани з листового матеріалу титанових сплавів ОТ4-0, ВТ6 для визначення їх деформаційних властивостей при ізотермічних умовах. Була спроектована та виготовлена установка для визначення оптимальних технологічних режимів формоутворення титанових сплавів та отримання взаємозв'язку геометричних параметрів, властивостей матеріалу та технологічних параметрів. Отриманні результати передбачено використовувати для розрахунків технологічного процесу формоутворення порожнистих лопаток ГТД з титанових сплавів газовим середовищем.

##### **3.3.1.1 Загальні положення та аналітичні залежності процесу формоутворення мембрани**

Процеси деформування листового матеріалу при формоутворенні мембран забезпечують отримання інформації про пластичні характеристики матеріалу при двохвісному розтязі для умов навантаження [170, 171, 123]. А також можуть бути використані при розрахунку та проектуванні процесів формоутворення деталей [172, 173].

В основу розрахунку мембран, як правило, покладено теорію оболонок [174]. Елементи цієї теорії використані при отриманні залежностей в подальших розрахунках.

Рівномірний двохосний розтяг можливо спостерігати при формоутворенні газовим середовищем мембрани, край якої затиснутий по периферії (рис. 3.2).

В процесі формоутворення мембрани спостерігається стійкий монотонний двовісний розтяг, який дозволяє отримати достатньо повну оцінку механічних властивостей листового металу внаслідок великих пластичних деформацій [136, 175, 137].

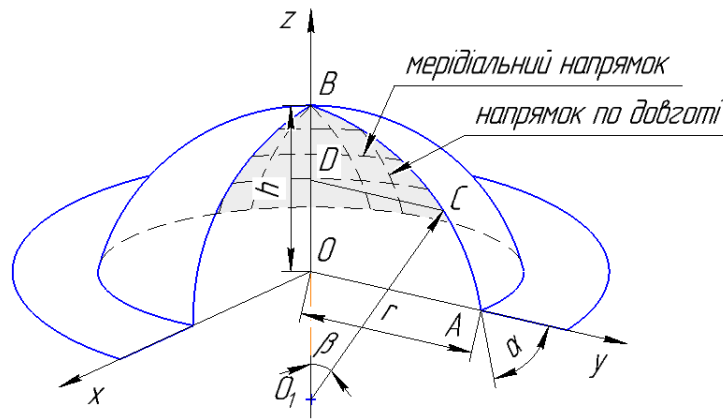


Рис. 3.2. Схема формоутворення мембрани

На величину пластичної деформації впливає схема напруженого стану. При формоутворенні мембран, які жорстко защемленні по контуру, при достатньо великому прогині, вид напружено-деформованого стану на випуклій поверхні куполу характеризується постійністю - двостороннім розтягом. На випуклій поверхні нормальне напруження по товщині стінки дорівнює нулю  $\sigma_3 = 0$ . Напруження  $\sigma_1$  та  $\sigma_2$  являються розтягуючими. Реалізується найбільш жорстка схема напруженого стану в умовах плоского напруженого стану.

Вид напруженого стану та його схема змінні на зовнішній опуклій поверхні.

При  $\sigma_3 = 0$  отримуємо:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot (e_1 - e_3) \\ \sigma_2 &= \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot (e_2 - e_3) \\ p &= \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot e_3\end{aligned}\tag{3.16}$$

де  $p$  - тиск газового середовища,

$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_1$  - інтенсивність напружень,

$e_i = \sqrt{e_3^2 + \frac{1}{3} \cdot (e_1 + e_2)^2}$  - інтенсивність деформацій,  $e_1, e_2, e_3$  - компоненти деформації.

В довільній точці куполу мембрани  $\sigma_1 \neq \sigma_2$ . В центрі куполу мембрани (на осі симетрії) напруження  $\sigma_1 = \sigma_2$ .

Натомість деформівний стан матеріалу стінки куполу є об'ємним. В довільній точці куполу виконується співвідношення головних деформацій  $e_3 = e_1 + e_2$ , при чому деформації  $e_1$  та  $e_2$  є розтягуючими. В центрі куполу мембрани деформації  $e_1 = e_2$ .

Величина деформації потоншення  $e_3$  змінюється поздовж напрямку по довготі від нуля ( $e_3 = 0$ ), в місці з'єднання куполу з фланцевою зоною, до  $e_3 = \max$  на осі симетрії куполу мембрани.

Тому на осі симетрії куполу мембрани (в центрі мембрани) діють максимальні деформації та максимальні напруження розтягу. Це призводить до того, що руйнування мембрани відбувається в центрі [176].

Ця обставина дає можливим визначати максимальні деформації, які досліджувані матеріали проявляють при рівномірному двовісному розтягуванні – граничне значення деформівності матеріалів при двовісному розтягуванні. Їх величина визначається експериментально.

Для визначення деформацій спроектована та виготовлена установка для формоутворення мембрани, вибрані титанові сплави для дослідження.

### 3.3.1.2. Заготовки, матеріали для деформування

Об'єктом дослідження являється плоский зразок діаметром 126 мм з титанових листів.

Для випробувань формоутворення в режимі надпластичності використовували зразки з двох титанових сплавів ОТ4-0 та ВТ6. Зразок з титанового сплаву ОТ4-0 товщиною 0,5мм, середній величиною зерна 9,4 мкм. Зразок з двофазного титанового сплаву ВТ6 товщиною 1мм.

Титановий сплав ОТ4-0 мартенситного типу відноситься к високопластичним матеріалам, системі  $Ti - Al - Mn$ . По хімічному складу ОТ4-

0 відноситься к  $\alpha$  – класу. Хімічний склад відповідає ГОСТ 19807-91, приведений в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Хімічний склад OT4-0 (Ti-0,8Al-0,8Mn)

Елемент	Fe	C	Si	Mn	N	Ti	Al	Zr	O	H	Дмішки
Масова	до	до	до	0,2-	до	95,94	0,2-	до	до	до	0,3
доля %	0,3	0,1	0,15	1,3	0,0 5	-99,6	1,4	0,3	0,15	0,012	

Титановий сплав BT6 мартенситного типу відноситься к високоміцним матеріалам, системі  $Ti - 6Al - 4V$ . По хімічному складу BT6 відноситься к  $\alpha + \beta$  – класу. Хімічний склад відповідає ГОСТ 19807-91, приведений в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Хімічний склад BT6 (Ti-6Al-4V)

Елемент	Fe	C	Si	V	N	Ti	Al	Zr	O	H	Дмішки
Масова	до	до	до	3,5-	до	86,48	5,3-	до	до	до	0,3
доля %	0,3	0,1	0,15	5,3	0,05	-91,2	6,8	0,3	0,2	0,015	

### 3.3.1.3. Схема процесу, експериментальне обладнання, та особливості формоутворення мембрани

Схема реалізації процесу формоутворення мембрани з листових заготовок в ізотермічних умовах представлена на рис. 3.3.

Установка для формоутворення мембрани розміщується в робочій зоні нагрівального обладнання де створюється і контролюється задана температура формоутворення мембрани. Тиск в робочій зоні установки, необхідно для формоутворення мембрани, регулюється системою манометр – редуктор. Для формоутворення використано інертний газ – аргон, який створює необхідний тиск та захищає заготовку з титанового сплаву від взаємодії з повітрям.

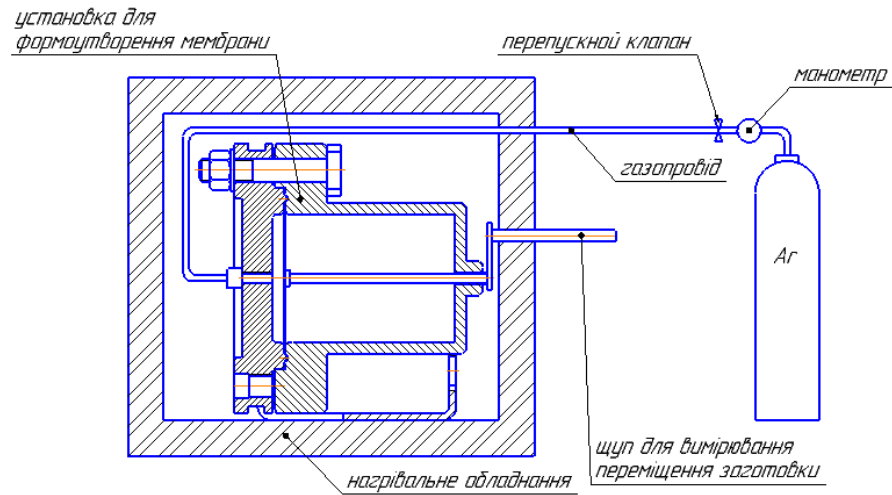


Рис. 3.3. Схема процесу формоутворення мембрани

Розроблено установку для досліджень процесу деформування листових напівфабрикатів металічних матеріалів в ізотермічних умовах. Установка призначена для отримання експериментальних значень деформацій листових матеріалів в умовах двовісного розтягу при формоутворення мембрани газовим середовищем, дослідження залежностей механічних властивостей металів від ступеня деформації та швидкості деформації. Конструкція установки дозволяє проводити випробування в температурному інтервалі до  $1000^{\circ}\text{C}$ , тиск газового середовища до 4 атм. (рис. 3.4.).

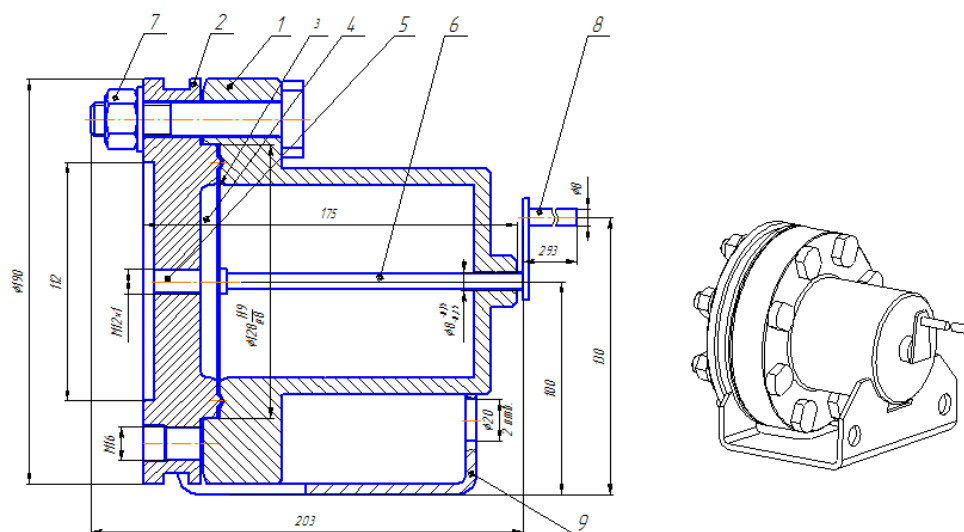


Рис. 3.4. Установка для досліджень деформування мембрани



Установка (рис. 3.4.) спроектована для деформування мембрани з титанових листів в ізотермічних умовах шляхом прикладання рівномірного розподіленого навантаження (газ - аргон). При глибокому формоутворенні зовнішнє тертя між прижимом, зразком та матрицею – корисне.

Осьова розтягуюча сила прикладається до зразка газовим середовищем (газ - аргон), через отвір в верхньому прижимі (2) (рис. 3.4.). Схема прикладання навантаження приведена на рис. 3.5.

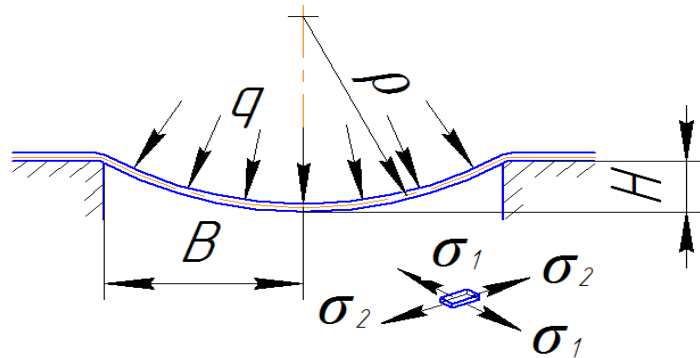


Рис. 3.5. Схема навантаження

Для виключення контакту гарячого металу з киснем, азотом і т.д., використовували захисне середовище – газ аргон. При високих температурах титанові сплави взаємодіють з газами, при тривалій витримці на поверхні заготовки утворюється альфірований шар, який погіршує пластичні властивості матеріалу. Аргон – інертний одноатомний газ, хімічно неактивний.

Пристрій для формоутворення складається з матриці 1 і прижима 2. Заготовка 3 зафіксована прижимом 2 в матриці 1. Порожнина 4 прижима 2 з'єднана з трубопроводом 5. В центрі матриці 1 знаходиться шток 6. Один кінець штока 6 спрямований до заготовки 3, а інший до штоку 8.

Заготовку 3 фіксують в матриці 1 прижимом 2 та болтовими з'єднаннями 7, забезпечуючи герметичність порожнини 4. Шток 6 і шток 8 фіксують етап формовки. Пристрій на підставці 9 встановлюємо у піч. Після нагріву пристрій до ізотермічних умов в порожнину 4 прижиму 2 подається аргон під тиском, який забезпечує деформацію зразка. При проведенні експерименту величина тиску була обмежена 5МПа.

Враховуючи високі робочі температури, великий тиск, доцільно для елементів пристосування використовувати жароміцні матеріали. Використана корозійностійка жароміцна сталь 12X18H9T. Сталь 12X18H9T відноситься до типу хромонікелевих сталей аустенітного класу. Сталь має високу корозійну стійкість. В умовах постійної безперервної роботи, сталь не піддається окисленню, як на повітрі, так і в агресивних середовищах до температури 900°C.

Отвір робочої порожнини матриці 90 мм, максимальна глибина, тобто висота мембрани, 119 мм (рис. 3.6.). При формоутворенні великої глибини з невеликою висотою стінки спостерігається нестійка течія фланця. Причина міститься в нерівномірності опору фланця деформуванню, тобто нерівномірність дії сил тертя між фланцем заготовки та інструменту. Вирішенням даної проблеми є рельєфна формовка, яка застосовується для додання жорсткості деталей, які виготовляються з тонкого листового матеріалу. Необхідно місцево змінити форму фланця так, щоб напруження, які виникають в заготовці, були мінімальними.

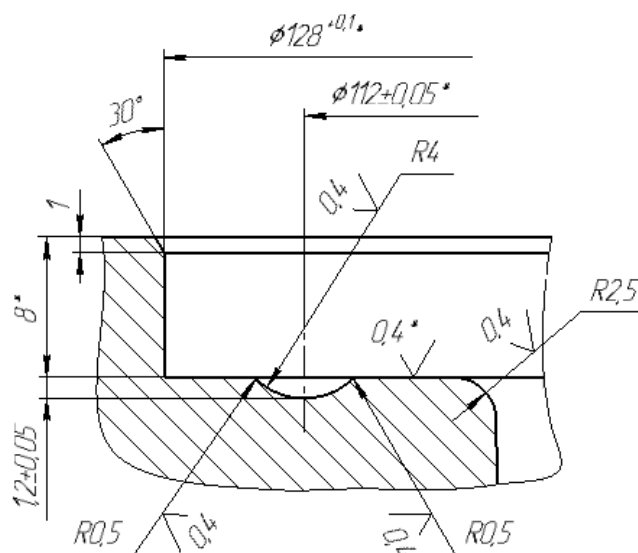


Рис. 3.6. Геометричні параметри матриці

Формоутворення рельєфу на фланці також необхідний для утворення герметизації в робочому просторі. Дана операція проводиться до установки в піч, при кімнатній температурі, на гідравлічному пресі для запресування.

Для формоутворення фланця сконструйовано пристрій (рис. 3.7.). пристрій необхідний для утворення рельєфу на фланці зразка до нагріву в зібраному стані установки. Збираємо установку для формоутворення мембрани, встановлюємо її в пристрій (рис.3.7.), фіксуємо на гідравлічному пресі і проводимо операцію по формоутворенню фланця.

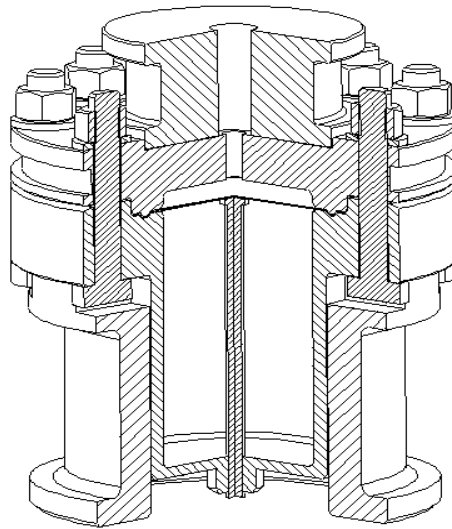


Рис. 3.7. Пристрій для формоутворення фланцю

Габарити пристосування для формоутворення вибирали відповідно до розмірів робочої камери печі. Умови процесу ізотермічні, для цього використовуємо електричну лабораторну піч СНОЛ 30/1300 (табл. 3.3.). Піч має програмний регулятор ТРМ 251. Температура в печі постійна.

Таблиця 3.3. Технічні характеристики печі СНОЛ 30/1300

№ п/п	Технічні характеристики	Значення
1.	Номінальна потужність, кВт	7,5
2.	Номінальна температура в робочому просторі, °C	1300
3.	Тип регулятора температур	ПІД, програматор
4.	Час розігріву до номінальної температури, хв.	80
5.	Розміри робочої камери, мм: ширина/довжина/висота	300/420/250
6.	Габаритні розміри, мм: ширина/довжина/висота	620/875/900

Після складання пристрій з розміщеним в ньому зразком через штуцер та трубопровід підключали до джерела газоносія (аргону) і подавали в робочу зону аргон під низьким тиском. Аргон подавали від балона, що має внутрішній тиск 600 МПа, по трубопроводу, який оснащений редукторами і манометром. Попередня подача аргону на холодний зразок необхідна для того, щоб при подальшому нагріванні до досліджуваної температури поверхня зразка не піддавалася насиченню шкідливими елементами з утворенням альфірованного шару, що приводить до погіршення якості титанового сплаву. Низький тиск енергоносія витримувалося до моменту прогріву пристрою і зразка до робочої температури, після чого відбувалося збільшення тиску.

Для усунення ефекту схоплення заготовок і робочої поверхні зажимного кільця пристрою за рахунок дифузійної взаємодії між заготовкою і матрицею наносимо тонкий шар плівки на основі нітриду бору в трьох станах: біла паста, рідина, порошок. Нітрид бора використовується для захисту робочої поверхні від прилипання сплавів та дифузійного зварювання. Досліджували як агрегатний стан змащування впливає на процес деформування.

Дослідження характеру деформації купола оболонки проводилося на різних технологічних режимах по температурі, тиску аргону. Зміна геометрії оболонки в часі визначалося по переміщенню штока 6 і 8 (рис. 3.4.) через кожні 2 хв.

Після формоутворення проводились виміри товщини стінки купола в центрі мембрани.

#### **3.3.1.4. Методика виміру деформацій в куполі мембрани**

Товщину та розподіл радіусів зразків після формоутворення вимірювали оптичним 3D-сканером Atos – оптична система відцентрування та вимірювання. Сканер Atos проводить повний аналіз всіх розмірів об'єктів з поверхнями складної форми.

ATOS Triple Scan - 3D-сканер промислового класу, безконтактна координатно-вимірювальна машина компанії GOM, призначений для

високоточного вимірювання як дуже дрібних так і великих об'єктів. Забезпечує точність до 10 мікрон зі швидкістю збору даних до 16 млн точок в секунду. Використовує відразу три незалежних сканування і технологію підсвічування Blue-Light, що забезпечує максимальну якість і стабільність результатів.

3D-сканер ATOS Triple Scan використовує для збору даних дві високоточні камери. Кожна з них може працювати незалежно, а також обидві разом можуть працювати разом, покриваючи більшу площу. Така технологія дозволяє забезпечити максимально точну передачу даних про геометрію навіть найскладніших об'єктів, прекрасно справляється з блискучими поверхнями. Крім того, система з трьома режимами зменшує кількість необхідних сканів, що значно прискорює процес збору даних.

Точність оптичних вимірювальних систем заснована на сучасній оптоелектроніці, точної обробці зображень і математичних алгоритмах, які забезпечуються стабільними стандартами точності і автоматизованої процедурою калібрування.

Датчики ATOS є системами самоконтролю. Датчики визначають зміна умов навколишнього середовища під час роботи. Програмне забезпечення датчиків постійно контролює стан калібрування, точність перетворення, зміни навколишнього середовища і руху деталей для забезпечення високоякісних вимірювальних даних.

На поверхню об'єкта проєктуються точні штрихові малюнки і захоплюються двома камерами на основі принципу стереокамери. Оскільки траєкторії променів як для камер, так і для проєктора відомі заздалегідь через калібрування, можна обчислити тривимірні координатні точки з трьох різних перетинів променів. Цей принцип потрійного сканування дає переваги для вимірювання відображають поверхонь і об'єктів з заглибленнями. Результатом є повні дані вимірювань без отворів або нестійких точок.

Дані вимірювань від ATOS Triple Scan утворюють основу тривимірного контролю і забезпечення якості частин і компонентів, наприклад, листового металу, оснащення і форм, турбінних лопатей, прототипів, а також частин, що

виготовляються інжекційним литтям і литтям під тиском. Цифровий 3D-сканер цілком сканує поверхню компонента, не торкаючись його. Використовуючи мільйони точок вимірювань, програмне забезпечення ATOS автоматично вираховує тривимірні координати у вигляді хмари точок з високою роздільною здатністю (тріангулювання сітки STL).

Для зворотного проектування, отримані в результаті сканування дані з математично описаних поверхонь (т.зв. поверхні NURBS) або твердих тіл можуть експортуватися у вигляді хмари точок STL або ASCII. Можливо експортування поперечних перерізів, маркерних і контрастних ліній, а також геометричних елементів в форматі IGES. Сама конвертація отриманих в результаті сканування даних у модель поверхні САПР вимагає особливих пакетів програмного забезпечення. Деякі САПР- програми на даний момент включають в себе модулі для зворотного проектування.

Ці полігональні сітки описують поверхні і геометричні елементи довільної форми, які після цього можуть бути порівняні з кресленнями або безпосередньо з пакетом даних САПР з метою аналізу форми і розміру.

У комплекті з 3D-сканером ATOS Triple Scan поставляється програмне забезпечення з широкими можливостями ATOS Professional. Наприклад, воно дозволяє проводити комплексну перевірку функціональності виробу, многозадачну параметричну перевірку під час сканування, просунуті інструменти редагування сітки, інспектування листового металу, створення вимірювальних планів, побудова зворотних проекцій і багато іншого. Всі ці функції реалізовані в простому наочному інтерфейсі.

Програмне забезпечення GOM пропонує безліч можливостей для оцінки даних вимірювань ATOS Triple Scan, включаючи контроль щодо даних креслення або САПР. Контроль щодо даних креслення базується на класичних робочих процесах тактильних координатно-вимірювальних машин. Для контролю щодо даних АПР, програмне забезпечення GOM пропонує численні інтерфейси, такі як IGES, JT Open, STEP, CATIA, NX, Solidworks і Pro / E.

Елементи FTA (функціональні відхилення і анотації) і вимірювальні плани (CSV-, DMI-, ASCII-, IPP) також можуть імпортуватися в програмне забезпечення.

Програмне забезпечення може порівнювати поверхні, поперечні перерізи і точки з даними САПР з метою аналізу частин і компонентів. На основі номінальних даних можуть генеруватися додаткові звичайні геометричні форми (лінії, площини, кола, циліндри). Програмне забезпечення також дозволяє проводити заснований на вимірюванні вигинів контроль - наприклад, аналіз зазорів і рівномірності, пружиніння, а також формених і характеристичних ліній. Крім цього, програмне забезпечення містить інструменти для завдання геометричних характеристик і допусків, що дозволяє визначати розміри, форми і позиції характеристик і, в кінцевому підсумку, забезпечує обчислення функції компонента. Для аналізу ідентичним чином сконструйованих частин є додатковий модуль побудови тенденцій, за допомогою якого можна виявити варіації компонентів в серійному виробництві.

Технологія проєкції GOM працює з вузькосмуговим синім світлом, що означає, що інтерферируючий навколишній світ може бути відфільтрований під час захоплення зображення. Джерела світла настільки потужні, що дані вимірювань захоплюються навіть на несумісних поверхнях. Крім того, світлодіоди технології Blue Light мають очікувану тривалість життя понад 10 000 годин.

Синій структурований підсвіт - передова технологія оптичного 3D-сканування. Значно покращує процес сканування темних і пофарбованих поверхонь, знижує вплив факторів зовнішнього середовища (освітлення, вологість, температура). Таким чином, технологія Blue-Light робить процес 3D-сканування максимально точним, а рядків ефективної роботи сканера - довгим.

### 3.3.2. Методика визначення режимів з'єднання заготовки з титанових сплавів методом зварювання тиском

#### 3.3.2.1. Загальні положення. Зразки зварних з'єднань. Заготовки. Матеріали

Основним завданням експериментальної роботи є визначення режимів з'єднання трьох заготовок титанових сплавів зварюванням тиском для наступного виконання складання пакету заготовки при формоутворенні фрагменту пера лопатки.

Відпрацювання якості з'єднання забезпечує сталий процес формоутворення фрагменту пера лопатки при пневмоформуванні.

Режими процесу з'єднання були відпрацьовані на зразках симетричного навантаження, які призначені для випробувань на одновісний розтяг.

На рис.3.8. показана схема зразка для зварювання тиском, який складається з трьох заготовок.

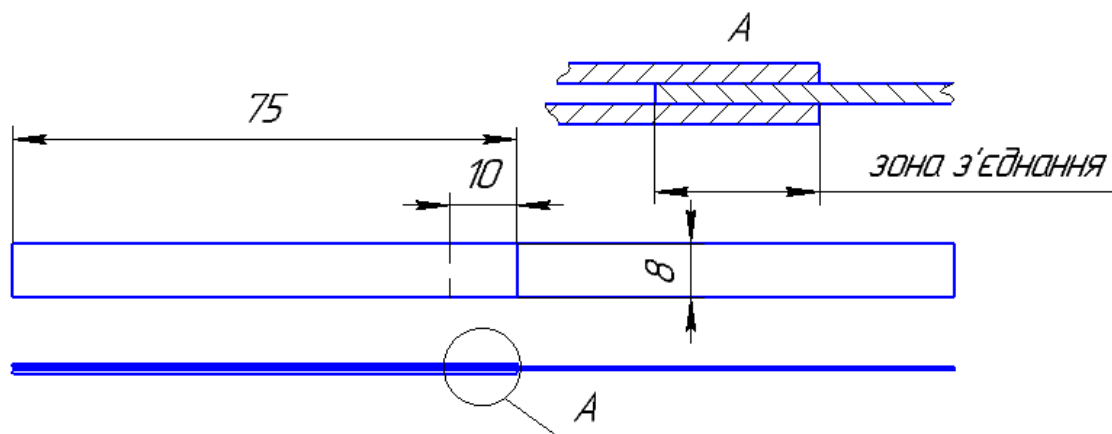


Рис.3.8. Схема зразка для зварювання тиском

В зоні з'єднання виконується зварювання тиском заготовок з однакового матеріалу габаритами  $75 \times 8 \times \delta$  (мм). Площа зони з'єднання складала 80 мм.

Зразки виготовлені з листів титанових сплавів ОТ4-1 товщиною 0,5мм та ВТ6 товщиною 1,1мм.



### 3.3.2.2. Експериментальний пристрій для зварювання тиском зразків

Схема пристрою для зварювання зразків тиском представлена на рис. 3.9.

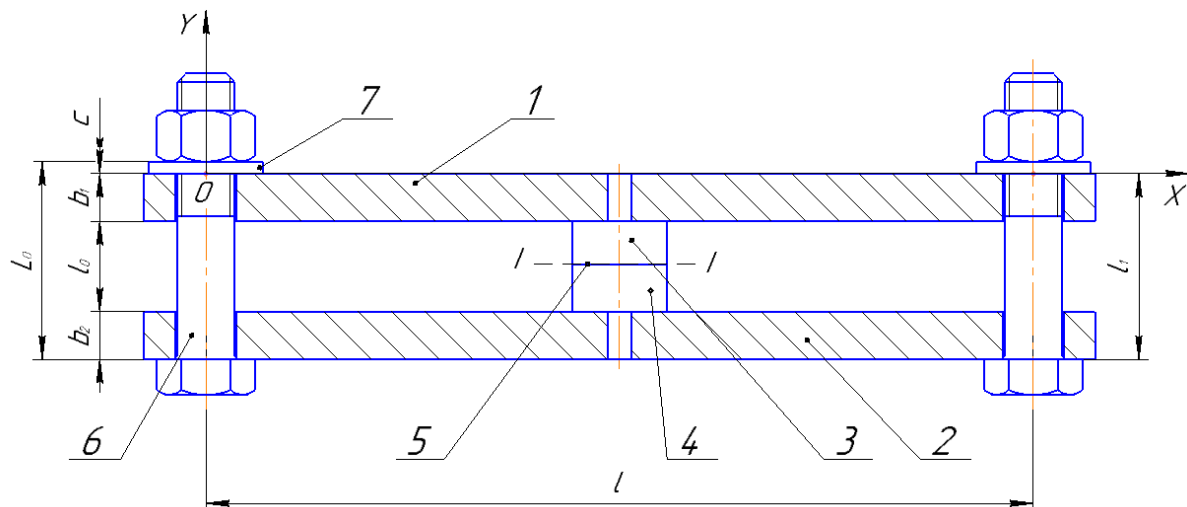


Рис. 3.9. Розрахункова схема пристрою для зварювання зразків:

1 – верхня плита; 2 – нижня плита; 3 та 4 – верхня та нижня нажимні вставки; 5 – пакет заготовок для зварювання; 6 – болт для створення зусилля; 7 – шайба.

Пакет заготовок з титанових сплавів розміщується між верхньою (3) та нижньою (4) нажимними вставками, які кріпляться на плитах (1) та (2). Плити з'єднуються болтами (6). При затягуванні болтів створюється зусилля на нажимних вставках, які стискають пакет титанових заготовок з заданим тиском.

При нагріванні пристрою в технологічному процесі зварювання будуть змінюватись лінійні розміри складових системи, а в залежності від цього можуть виникати термонапруження, якщо він виконаний з різних матеріалів.

Враховуючи високий інтервал температур  $700^{\circ} - 900^{\circ}C$  в конструкції пристрою використані жаростійкі та жароміцні матеріали для деталей:

- плити, болти, шайби – нікелевий сплав ЖС6К-ВИ;
- нажимні вставки – хромонікелева сталь Х18Н9Т.

Механічні та фізичні властивості цих матеріалів наведені в таблиці 3.4. та в таблиці 3.5.

Таблиця 3.4. Механічні властивості сплаву на основі нікелю ЖС6К-ВИ при кімнатній та робочій температурах

$T, ^\circ C$	$E, \text{МПа}$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\alpha \cdot 10^{+6}, \frac{1}{^\circ C}$
$20^\circ C$	$2,0 \cdot 10^5$	900–1000	830–850	11,0–11,4
$800^\circ C$	$1,51 \cdot 10^5$	900–940	830–850	14,7–15,2
$900^\circ C$	$1,25 \cdot 10^5 - 1,3 \cdot 10^5$	750–850	500–520	15,2–15,9

Таблиця 3.5. Механічні властивості хромонікелевої сталі Х18Н9Т при кімнатній та робочій температурах

$T, ^\circ C$	$E, \text{МПа}$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\alpha \cdot 10^{+6}, \frac{1}{^\circ C}$
$20^\circ C$	$1,88 \cdot 10^5$	620	280	16,1
$700^\circ C$	$1,225 \cdot 10^5$	280	160	19,1
$800^\circ C$	$0,91 \cdot 10^5$	180	100	19,4

Розглянемо особливості виконання конструкцій пристрою за умови відсутності термонапружень в системі. Це виконується у випадку коли переміщення поверхонь нажимних вставок при підвищенні температури у перерізі  $I-I$  відсутні.

Розкриття стику в перерізі  $I-I$  буде відбуватись за рахунок подовження болтів по довжині  $L_0$ :

$$\Delta L = \alpha_1 \cdot T \cdot L_0 = \alpha_1 \cdot T \cdot (l_0 + b_1 + b_2 + c). \quad (3.17)$$

Стискання системи забезпечується за рахунок зміни розмірів  $l_1 = b_1 + b_2 + l_0$ :

$$\Delta l_1 = T \cdot [\alpha_2 \cdot l_0 + \alpha_1 \cdot (b_1 + b_2)]. \quad (3.18)$$

Таким чином відсутність переміщення в перерізі  $I-I$  буде відбуватися при

$$\Delta L = \Delta l_1, \quad (3.19)$$

звідки

$$\alpha_1 \cdot T \cdot (l_0 + b_1 + b_2 + c) = T \cdot [\alpha_2 \cdot l_0 + \alpha_1 \cdot (b_1 + b_2)]. \quad (3.20)$$

Рішення рівняння

$$\alpha_1 \cdot l_0 + \alpha_1 \cdot c = \alpha_2 \cdot l_0. \quad (3.21)$$

Тоді

$$c = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_1} \cdot l_0. \quad (3.22)$$

Величина  $l_0$  вибрана конструктивно і дорівнює 17,5 мм.

$$c = \frac{0,0000194 - 0,0000156}{0,0000156} \cdot 17,5 = 4,26 \text{ мм}.$$

Величина  $b_1$  та  $b_2$  - обираються конструктивно з умови жорсткості плит для забезпечення необхідного натягу  $b_1 = 15 \text{ мм}$  та  $b_2 = 15 \text{ мм}$ .

Таким чином управління умовами з'єднання на нажимних вставках на поверхні роз'єму  $I-I$  можна досягти за рахунок вибору висоти шайби  $c$ .

Залежність (3.22) дає можливість також визначити компенсаційний розмір висоти  $c$  шайб для довільно вибраних розмірів елементів системи (див. рис. 3.9.).

### 3.3.2.3. Розрахунок діаграми навантаження

В процесі проведення експерименту в замкнутій системі в перерізі  $I-I$  розміщується пакет заготовок з титанового сплаву товщиною  $\delta_n$ . Коефіцієнт лінійного розширення для титанових сплавів ВТ6 та ОТ4-1 відрізняється від сплавів, що використовуються в системі. В загальному випадку  $\alpha_{T_i} \neq \alpha_1$  та  $\alpha_{T_i} \neq \alpha_2$ . Тому для забезпечення точності навантаження та усунення фактору термонапружень, наявність пакету заготовок треба враховувати. Розрахункова схема представлена на рис. 3.10.

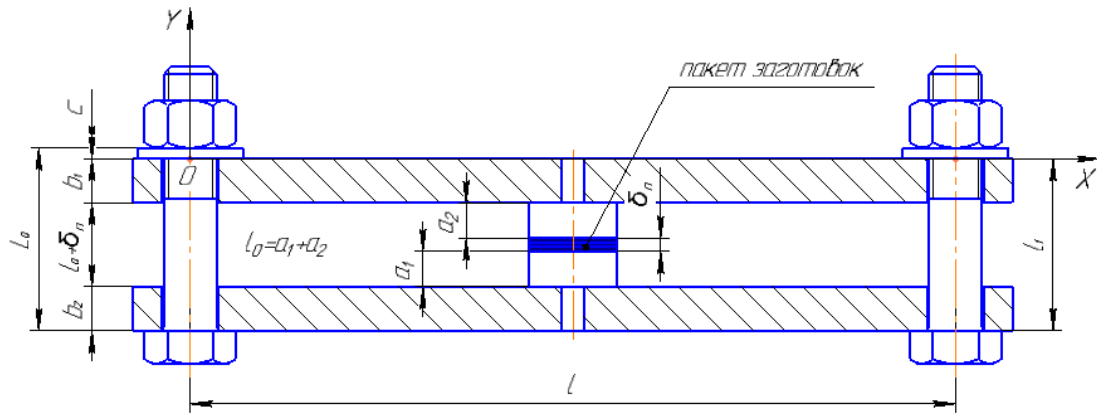


Рис. 3.10. Розрахункова схема пристрою для зварювання при наявності пакету зразків

В даному випадку рівняння (3.17) та (3.18) будуть мати наступний вид:

$$\Delta l_{1T} = T \cdot (\alpha_2 \cdot l_0 + \alpha_1 \cdot (b_1 + b_2) + \alpha_{Ti} \cdot \delta_n), \quad (3.23)$$

$$\Delta l_T = \alpha_1 \cdot T \cdot (l_0 + b_1 + b_2 + c_T + \delta_n). \quad (3.24)$$

Тоді рівняння (3) в розгорнутому вигляді має вид:

$$T \cdot (\alpha_2 \cdot l_0 + \alpha_1 \cdot (b_1 + b_2) + \alpha_{Ti} \cdot \delta_n) = \alpha_1 \cdot T \cdot (l_0 + b_1 + b_2 + c_T + \delta_n). \quad (3.25)$$

Висоти компенсуючої шайби буде дорівнювати:

$$c_T^I = l_0 \cdot \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_1} + \delta_n \cdot \frac{\alpha_{Ti} - \alpha_1}{\alpha_1}. \quad (3.26)$$

Так для зварювання пакетів заготовок з титанових сплавів ВТ6 сумарною товщиною 3,3мм висота компенсуючої шайби повинна бути 3,075мм, а для пакету заготовок сплаву ОТ4-1 загальною товщиною 1,5мм висота шайби 3,72мм.

В процесі проведення експерименту по зварюванню зразків пакет заготовок встановлюються між нажимними вставками (рис. 3.9.). Зусилля стиску пакету заготовок  $P$  створюють шляхом затягування болтів. Величину зусилля  $P$  визначають шляхом заміру прогину верхньої або нижньої плити експериментального пристрою. Для цього побудуємо діаграму навантаження – залежність зусилля навантаження пакету заготовок від прогину плити.

Для знаходження залежності розглянемо прогини плити як балку на двох опорах постійного поперечного перерізу [177], що навантажена постійною силою  $P$ , яка знаходиться на однаковій відстані до опор.

Прогин плити описується диференціальним рівнянням виду:

$$\frac{d^2 y(x)}{dx^2} = \frac{M(x)}{E y(z)}, \quad (3.27)$$

де  $M(x)$  – момент згину;

$E \cdot y(z)$  – жорсткість поперечного перерізу плити;

$y(z)$  – функція прогибу.

Максимальний прогин  $y_{\max}$  відповідає точці  $x = \frac{l}{2}$ .

Рішення диференціального рівняння (3.27) при граничних умовах:

при  $x = 0; y_1 = 0$ ;

при  $x = l; y_2 = 0$ ;

при  $x = \frac{l}{2}; y_1 = y_2$ ;

дає розв'язок

$$y_{\max} = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot y_z}, \quad (3.28)$$

що відповідає рішенням [178].

Зусилля затиску пакету заготовок в залежності від прогину визначається формулою:

$$P = \frac{48 \cdot E \cdot y_z}{l^3} \cdot y_{\max}. \quad (3.29)$$

Враховуючи значення моменту інерції прямокутного поперечного перерізу плити висотою  $b$  та шириною  $g$ , то, в загальному вигляді, зв'язок (3.29) має вид:

$$P = \frac{4 \cdot E \cdot g \cdot b^3}{l^3} \cdot y_{\max} \quad (3.30)$$

Залежність (3.30) дала можливість побудувати графік, який представлено на рис. 3.11.

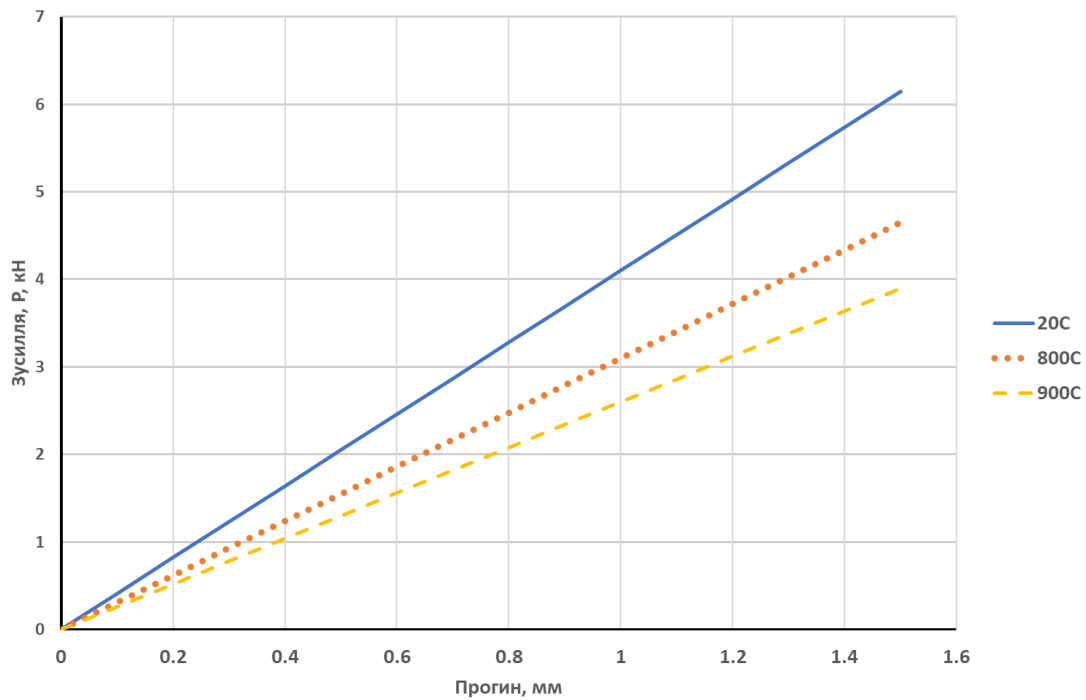


Рис. 3.11. Залежність зусилля стиску від прогину для кімнатної та інтервалу робочих температур

Графічна залежність на рис. 3.11 Дозволяє на етапі затягуванні пакету заготовок визначити зусилля стиску заготовок при дифузійному зварюванні тиском.

#### 3.3.2.4. Методика визначення якості з'єднання

Оцінювання якості з'єднання на зразках виконували по наступним показникам.

1. Характер руйнування при механічних випробуваннях на одновісний розтяг з використанням машини INSTRON-8862 (Німеччина). Позитивним результатом вважали руйнування по основному металу зразка, коли зона руйнування знаходиться за межами зварного з'єднання;

2. Величина потоншення товщини зварного з'єднання. Величина потоншення зварної плями не повинна бути більше ніж 5-7% від суми реальних товщин пакету заготовок в місці з'єднання. Перевищення величини потоншення вимагає зменшення контактного тиску в процесі з'єднання;

3. Наявність утворення безперервного контакту по всій поверхні заготовок в місті з'єднання. Допускалась наявність лінійних зазорів не більше 10% від довжини лінії контакту. Аналіз виконували на темплетах зварного з'єднання при металографічних дослідженнях. Проведення аналізу визначало мінімальну границю контактного тиску при зварюванні тиском.

### 3.3.3. Методика виконання експериментальних робіт по виготовленню фрагменту порожнистої лопатки ГТД

Для формоутворення елементу порожнистої лопатки була сконструйоване та виготовлене оснащення (рис. 3.12.). Оснащення складається з двох матриць: матриця нижня (6) та матриця верхня (7). Заготовка (4) між двома матрицями кріпиться завдяки двом напівтулкам (8), розміри яких залежить від загальної товщини пакета. Завдяки двом колонкам (9) позиціонується матриця відносно іншої. Матриці фіксуються 12 – ма болтами (10). Всі деталі оснащення виготовлені з нержавіючої сталі Х19Н9Т і 12Х18Н9Т. На поверхні матриць, яка утворює елемент порожнистої лопатки, передбачені отвори діаметром 2 мм для виходу повітря. Додаткові отвори по периметру матриць необхідні для транспортування та розборки оснащення (рис. 3.12).

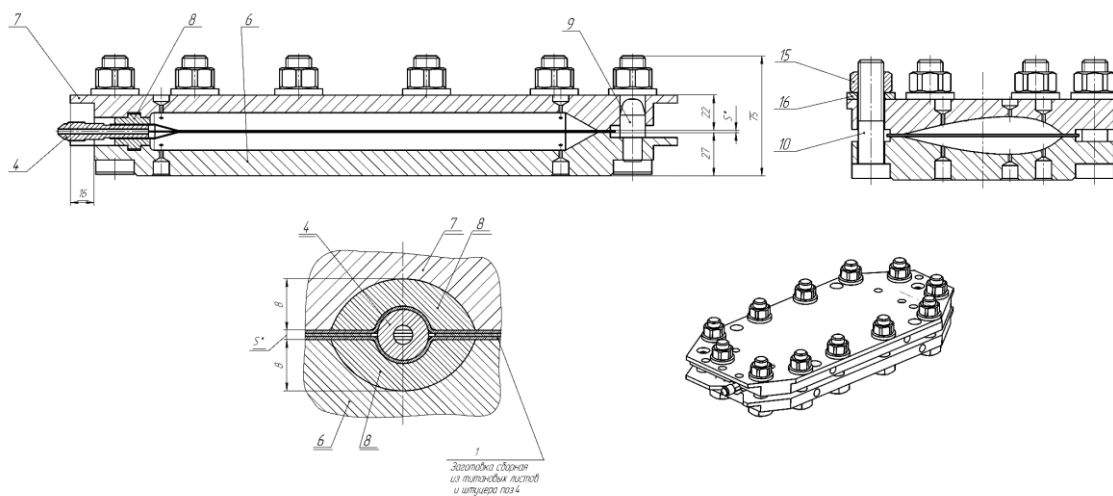


Рис. 3.12. Оснащення для виготовлення елементу порожнистої лопатки

Установка включає нагрівальну систему, систему подачі тиску, оснащення для формоутворення елемента порожнистої лопатки та набір трубок, які з'єднують елементи. Дослідження проводяться наступним чином. Спочатку наноситься покриття NB на поверхні матриць та втулок. Листову заготовку вкладають в матрицю та болтовими з'єднаннями закріплюється інша матриця відносно другої. Оснащення встановлюється в нагрівальне устаткування, підключаючи за допомогою штуцерів та трубок до системи подачі аргону. З цього моменту фіксується час формоутворення. Під низьким тиском проводиться витримка для нагріву оснащення та заготовки. Після цього збільшується тиск подачі аргону до робочого.

Нагрівальним устаткуванням є електрична муфельна піч СНОЛ30/1300. Піч має програмний регулятор ТРМ 251. Температура постійна.

Об'єкт дослідження - збірна заготовка з двох титанових листів товщиною 0,5 мм, 1мм зі сплаву ОТ4-0 та штуцера (рис. 3.13., а), або з трьох титанових листів зі сплаву ОТ4-0 та штуцера (рис. 3.13., б).

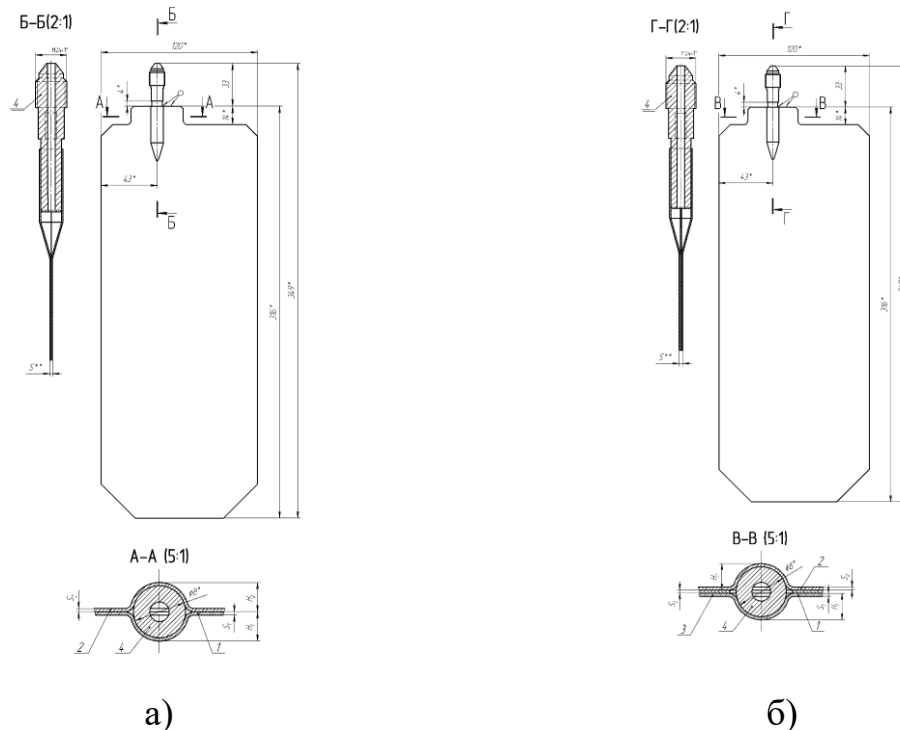


Рис. 3.13. Заготовка елемента порожнистої лопатки: а) збірна заготовка з 2-х титанових листів та штуцера; б) збірна заготовка з 2-х титанових листів та штуцера



Дві заготовки розміром  $316 \times 120$  мм утворюють елемент обшивки (рис. 3.14., а), третя заготовка (наповнювач), розташована між двома іншими заготовками розміром  $302 \times 120$  мм утворює ребра жорсткості (рис. 3.14., б). Товщина заготовок – розмір змінний, залежить від сумарної товщини заготовок.

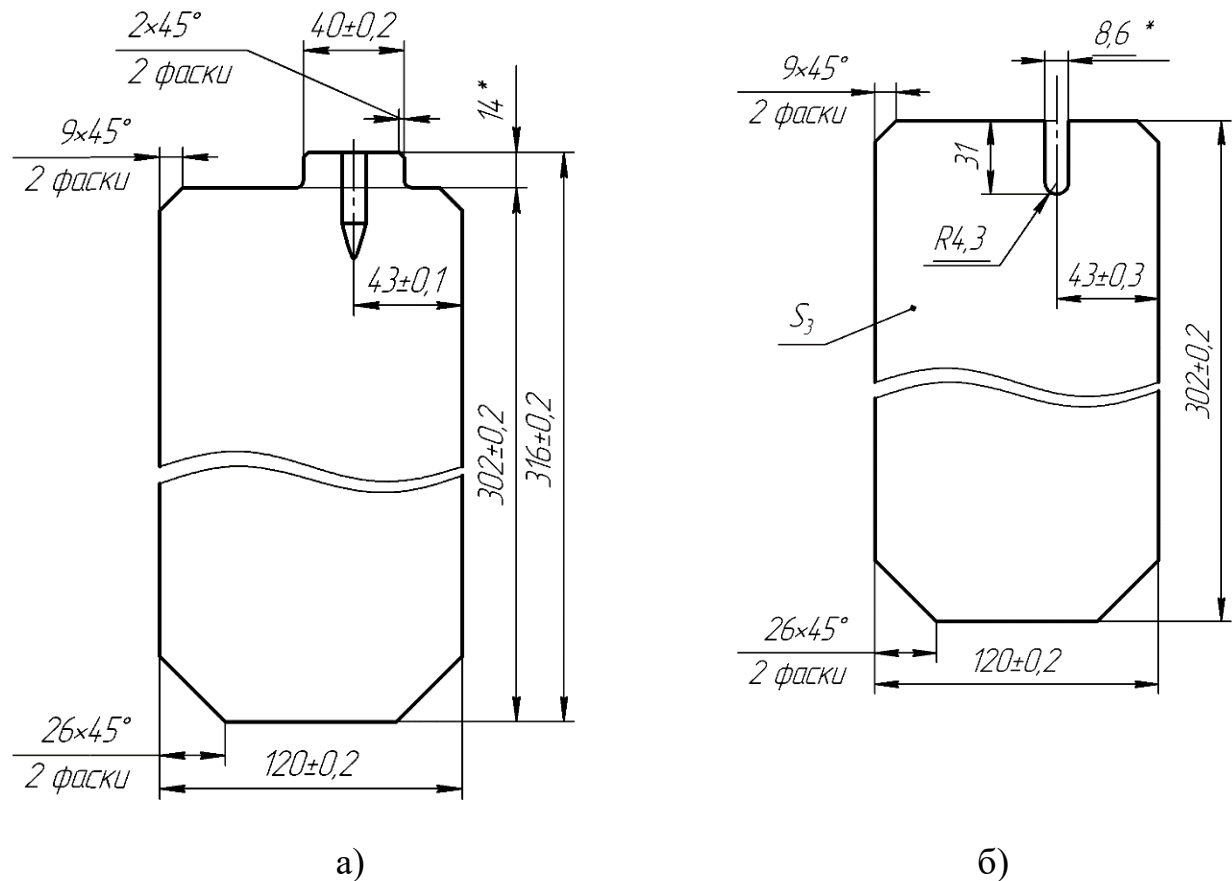


Рис. 3.14. Форма заготовок: а) заготовка обшивки; б) заготовка наповнювача

Матеріал штуцера ОТ4-1 ГОСТ 26492-85, матеріал заготовок – титановий лист ОТ4-0. Титанові листові заготовки та штуцер збираються та зварюванням по контуру з'єднуються герметично. Зварювання в вакуумній камері в середовищі аргону високого очищення: присадна проволока ОТ4 діаметром 1,5мм, в пальнику – вольфрам діаметром 1,5 мм.

Деформуюче середовище через штуцер подається в робочу порожнину та формує до необхідної форми (рис. 3.15). В залежності від товщини листів змінюється глибина формоутворення (табл. 3.6.).

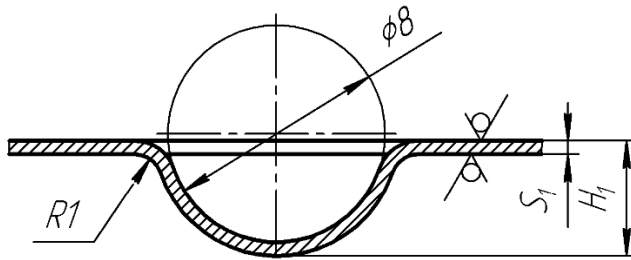


Рис. 3.15. Схема формоутворення

Таблиця 3.6. Глибина формоутворення

Товщина заготовок, мм			$H_1$
$S_1$	$S_2$	$S_3$	
0,5	0,5	-	4,5
1,0	1,0	-	5,0
0,5	0,5	0,5	4,25
1,0	1,0	1,0	4,5

### 3.4. Висновки до розділу 3

1. Розроблена структурна схема загальної методики виконання процесу формоутворення фрагменту порожнистої лопатки з листових титанових сплавів.

Визначена необхідність проведення теоретичних досліджень формоутворення порожнистої лопатки в ізотермічних умовах.

2. Розроблена методика розрахунку процесу формоутворення порожнистої лопатки чисельними методами в програмному комплексі Deform в в'язкопластичній постановці. Показано, що для забезпечення точності розрахунків необхідно визначити реальну математичну модель деформування металу (титанових сплавів) для умов деформування. Запропоновано експериментально-аналітичний метод визначення моделі в'язкопластичного матеріалу на основі випробувань на згин з використанням рівнянь рівноваги моментів сил процесу чистого згину з урахуванням проміжку часу деформування. Для цього побудована модель згину широкої полоси в чотирьохмірному просторі циліндричної системи координат з використанням загальних рівнянь механіки суцільних середовищ та заданим полем швидкостей переміщення матеріальних точок заготовки в осередку деформацій.

3. Для оцінки граничного стану матеріалу в ізотермічних умовах деформування в роботі запропоновано визначення величини граничної накопиченої пластичної деформації при випробуваннях матеріалу на двовісний розтяг при формоутворенні мембрани газовим середовищем з листового матеріалу. Величина граничної накопиченої пластичної деформації дає

можливість з використанням відомих критеріїв руйнування (Кокрофта-Летема, Brozzo), які використовують в Deform, провести аналіз граничних можливостей деформування металу (заготовок) при ізотермічному формоутворенні порожнистої лопатки. Тому в роботі розроблено експериментальна методика визначення величини граничної накопиченої деформації за результатами випробувань мембран на двовісний розтяг.

## 4. Теоретичний розділ

### 4.1. Розробка експериментально – аналітичного методу побудови моделі в'язкопластичного матеріалу на основі випробувань на згин

#### 4.1.1. Розробка загальної структури експериментально – аналітичного методу визначення моделі матеріалу за результатами випробувань на згин

В роботі [179] розглянуто метод експериментально – аналітичної побудови кривих деформування для моделювання матеріалів при випробуваннях на згин, який дозволяє ефективно моделювати властивості деформування матеріалів в рамках моделі пружньопластичного суцільного середовища. В цих моделях опір деформуванню ( $\sigma$ ) матеріалу являється функцією ступеня деформації ( $e$ ) [170].

При формоутворенні деталей в умовах гарячої пластичної деформації опір деформуванню металів залежить також від фактору часу. В цьому випадку використовують, як правило, залежність між напруженнями та швидкістю деформації ( $\varepsilon$ ) [180, 175, 181]. При цьому необхідно відмітити, що опір деформуванню в цьому випадку залежить також від ступеня деформації [181, 182]:

$$\sigma = F(e, \varepsilon) \quad (4.1)$$

Зокрема в роботі [181] приведена модель матеріалу, яка задана функцією

$$\sigma = Ke^n \varepsilon^m \quad (4.2)$$

Алгоритм побудови в'язкопластичної моделі металів для ізотермічних умов при випробуваннях на згин складається з наступних етапів:

1. Вибір моделі метала в вигляді функції з невідомими лінійними коефіцієнтами.

Для побудови в'язкопластичної моделі матеріалу була прийнята аналітична залежність, яка виражена ступеневою функцією виду (4.1). Для апроксимації кривої деформування використовуємо ірраціональний поліном восьмого ступеня у вигляді:

$$\sigma_i = ae_i + be_i^{1/2} + ce_i^{1/4} + de_i^{1/8} + A\varepsilon_i + B\varepsilon_i^{1/2} + C\varepsilon_i^{1/4} + D\varepsilon_i^{1/8} \quad (4.3)$$

де  $\varepsilon_i$  - інтенсивність швидкостей деформацій,  $e_i$  - інтенсивність деформацій.

2. Теоретичне отримання системи лінійних рівнянь для визначення коефіцієнтів з використанням експериментальних результатів.

Визначальні рівняння в роботі отримані для моменту внутрішніх сил при згині відносно центру кривизни [169, 183], який в загальному вигляді мають вид:

$$M = \int_{R_B}^{R_H} \sigma_r r dr \quad (4.4)$$

3. Експериментальне визначення залежності радіусу згину заготовки, що деформується, від величини моменту навантаження при чистому згині, часу навантаження і температури деформування;

4. Вирішення системи рівнянь для визначення невідомих лінійних коефіцієнтів.

Для отримання визначальних рівнянь необхідно також експериментально установити зв'язок між кінематичними параметрами заготовки при чистому згині в залежності від часу деформування.

#### 4.1.2. Розробка кінематичної моделі чистого згину широкої заготовки

Для опису величини деформації та швидкості деформації використана кінематична модель чистого згину широкої заготовки з листового металу, яка враховує параметр часу ( $t$ ) [179].

Аналіз чистого пластичного згину виконувався в циліндричній системі координат. Вважалось, що деформований стан - плоский, а напружений стан об'ємний.

Поле швидкостей при чистому циліндричному згині приймає наступний вид:

$$\begin{aligned} V_r &= -\frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t} \left[ r + \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r} \right]; \\ V_\phi &= 2 \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t} r \phi; \\ V_z &= 0, \end{aligned} \quad (4.5)$$

де  $R_{H_0}, R_{B_0}, \varphi$  - відповідно значення внутрішнього і зовнішнього радіусів вигнутої заготовки та кут згину в початковий момент часу;

$V_0$  - швидкість зміни радіусів  $R_H, R_B$  при згинанні, де величини поточних радіусів поверхні заготовки визначаються залежностями  
 $R_B = R_{B_0} - V_0 t, R_H = R_{H_0} - V_0 t$

По відомому полю швидкостей визначаєм компоненти тензора швидкостей деформації:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} = -\varepsilon_{\varphi\varphi} &= -\frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right]; \\ \varepsilon_{zz} &= 0; \varepsilon_{r\varphi} = 0; \varepsilon_{\varphi z} = 0; \varepsilon_{zr} = 0. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Інтенсивність швидкостей деформації

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi\varphi})^2 + (\varepsilon_{\varphi\varphi} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{rr})^2 + \frac{2}{3}(\varepsilon_{r\varphi}^2 + \varepsilon_{\varphi z}^2 + \varepsilon_{zr}^2)} \quad (4.7)$$

Підставимо компоненти тензора швидкостей деформації (4.6) в рівняння (4.7):

$$\varepsilon_i = \frac{2}{3} |\varepsilon_{\varphi\varphi}|. \quad (4.8)$$

Величини деформацій в загальному випадку визначаються інтегральним співвідношенням від компонент тензора швидкостей деформацій  $e_{jk} = \int_t \varepsilon_{jk} dt$ , де

$$j \text{ та } k \text{ приймають значення координат } r, \varphi, z, \quad j = \begin{cases} r \\ \varphi \\ z \end{cases}, \quad k = \begin{cases} r \\ \varphi \\ z \end{cases}.$$

Враховуючи, що для широкої полоси прийнято плоский деформований стан, можна записати:

$$e_{rr} = e_{\varphi\varphi}, e_{zz} = 0, e_{r\varphi} = 0, \quad (4.9)$$

де  $e_{rr}, e_{\varphi\varphi}, e_{zz}, e_{r\varphi}$  - компоненти тензора деформацій в циліндричній системі координат.

Інтенсивність деформацій:

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{rr} - e_{\varphi\varphi})^2 + e_{\varphi\varphi}^2 + e_{rr}^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} |e_{\varphi\varphi}|. \quad (4.10)$$

Величину розподілу тангенціальних деформацій, враховуючи прийняту гіпотезу плоских перерізів та монотонність процесу деформування, можна також представити з достатнім ступенем точності як:

$$e_{\varphi\varphi} = \ln \frac{r}{\rho}, \quad (4.11)$$

де  $\rho$  – радіус нейтральної поверхні, рівний  $\rho = \sqrt{R_H \cdot R_B}$

При розкладанні логарифму в ряд з точністю до першого члену:

$$e_{\varphi\varphi} = \frac{r}{\rho} - 1. \quad (4.12)$$

Інтенсивність напруження  $\sigma_i$  має зв'язок з інтенсивністю деформацій  $e_i$  і інтенсивністю швидкостей деформацій  $\varepsilon_i$  функцією (4.3.).

#### 4.1.3. Отримання визначальних рівнянь в загальному вигляді

Враховуючи рівняння (4.7), (4.8), (4.9), (4.12) апроксимуюча крива деформування (4.3) має вид:

$$\begin{aligned} \sigma_i = & a \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{r}{\rho} - 1 \right) + b \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{r}{\rho} - 1 \right) \right)^{1/2} + c \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{r}{\rho} - 1 \right) \right)^{1/4} + d \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{r}{\rho} - 1 \right) \right)^{1/8} + \\ & + A \frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0t)(R_{B_0} - V_0t)}{r} \right] + \\ & + B \left( \frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0t)(R_{B_0} - V_0t)}{r} \right] \right)^{1/2} \\ & + C \left( \frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0t)(R_{B_0} - V_0t)}{r} \right] \right)^{1/4} + \\ & + D \left( \frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0t)(R_{B_0} - V_0t)}{r} \right] \right)^{1/8} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Момент внутрішніх сил відносно центру кривизни заготовки при згинанні (4.4.) з врахуванням рівняння (4.13), має вид:

$$\begin{aligned}
M &= 2 \int_{\rho}^{R_H} \sigma(r - \rho) dr = 2 \int_{\rho}^{R_H} (ae + be^{\frac{1}{2}} + ce^{\frac{1}{4}} + de^{\frac{1}{8}} + A\varepsilon + B\varepsilon^{\frac{1}{2}} + C\varepsilon^{\frac{1}{4}} + D\varepsilon^{\frac{1}{8}})(r - \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}) dr = \\
&= 2 \left( a \int_{\rho}^{R_H} \frac{2}{\sqrt{3}} \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right| \cdot r dr - \int_{\rho}^{R_H} a \frac{2}{\sqrt{3}} \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right| \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} dr + \right. \\
&+ \int_{\rho}^{R_H} b \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right|^{\frac{1}{2}} \cdot r dr - \int_{\rho}^{R_H} b \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right|^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} dr + \\
&+ \int_{\rho}^{R_H} c \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{3}} \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right|^{\frac{1}{4}} \cdot r dr - \int_{\rho}^{R_H} c \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{3}} \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right|^{\frac{1}{4}} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} dr + \\
&+ \int_{\rho}^{R_H} d \cdot \sqrt[8]{\frac{2}{3}} \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right|^{\frac{1}{8}} \cdot r dr - \int_{\rho}^{R_H} d \cdot \sqrt[8]{\frac{2}{3}} \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right|^{\frac{1}{8}} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} dr + \\
&+ \int_{\rho}^{R_H} A \frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right] \cdot r dr - \int_{\rho}^{R_H} A \frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right] \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} dr + \\
&+ \int_{\rho}^{R_H} B \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t}} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot r dr - \int_{\rho}^{R_H} B \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t}} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} dr + \\
&+ \int_{\rho}^{R_H} C \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t}} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right]^{\frac{1}{4}} \cdot r dr - \int_{\rho}^{R_H} C \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t}} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right]^{\frac{1}{4}} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} dr + \\
&+ \int_{\rho}^{R_H} D \cdot \sqrt[8]{\frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t}} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right]^{\frac{1}{8}} \cdot r dr - \int_{\rho}^{R_H} D \cdot \sqrt[8]{\frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t}} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right]^{\frac{1}{8}} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} dr \Big) \quad (4.14)
\end{aligned}$$

З врахуванням (4.8), (4.10), (4.12) питомий момент (4.14) складається з 16 складових:

$$\begin{aligned}
M &= 2 \int_{\rho}^{R_H} \sigma(r - \rho) dr = \\
&= 2 \int_{\rho}^{R_H} (ae + be^{\frac{1}{2}} + ce^{\frac{1}{4}} + de^{\frac{1}{8}} + A\varepsilon + B\varepsilon^{\frac{1}{2}} + C\varepsilon^{\frac{1}{4}} + D\varepsilon^{\frac{1}{8}})(r - \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}) dr = \\
&= 2 \cdot (M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7 + M_8 + M_9 + M_{10} + M_{11} + M_{12} + M_{13} + M_{14} + M_{15} + M_{16})
\end{aligned} \quad (4.15)$$

де  $e = \frac{2}{\sqrt{3}} \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right|$  - інтенсивність деформацій;

$\rho = \sqrt{R_H \cdot R_B} = \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}$  - радіус нейтральної поверхні;

$\varepsilon_i = \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t} \left| 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right|$  - інтенсивність швидкостей.

Розпишемо, чому дорівнює кожний момент:

$$M_1 = \int_{\rho}^{R_H} a \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right| \cdot r dr$$

$$M_2 = - \int_{\rho}^{R_H} a \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right| \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} dr$$

$$M_3 = \int_{\rho}^{R_H} b \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right|^{\frac{1}{2}} \cdot r dr$$



$$M_4 = - \int_{\rho}^{R_H} b \cdot \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right|^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} dr$$

$$M_5 = \int_{\rho}^{R_H} c \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right|^{\frac{1}{4}} \cdot r dr$$

$$M_6 = - \int_{\rho}^{R_H} c \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right|^{\frac{1}{4}} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} dr$$

$$M_7 = \int_{\rho}^{R_H} d \cdot \sqrt[8]{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right|^{\frac{1}{8}} \cdot r dr$$

$$M_8 = - \int_{\rho}^{R_H} d \cdot \sqrt[8]{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot \left| 1 - \frac{r}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right|^{\frac{1}{8}} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} dr$$

$$M_9 = \int_{\rho}^{R_H} A \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t} \left| 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right| \cdot r dr$$

$$M_{10} = - \int_{\rho}^{R_H} A \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t} \left| 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right| \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} dr$$

$$M_{11} = \int_{\rho}^{R_H} B \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t}} \left| 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right|^{\frac{1}{2}} \cdot r dr$$

$$M_{12} = - \int_{\rho}^{R_H} B \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t}} \left| 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right|^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} dr$$

$$M_{13} = \int_{\rho}^{R_H} C \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t}} \left| 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right|^{\frac{1}{4}} \cdot r dr$$

$$M_{14} = - \int_{\rho}^{R_H} C \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t}} \left| 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right|^{\frac{1}{4}} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} dr$$

$$M_{15} = \int_{\rho}^{R_H} D \cdot \sqrt[8]{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t}} \left| 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right|^{\frac{1}{8}} \cdot r dr$$

$$M_{16} = - \int_{\rho}^{R_H} D \cdot \sqrt[8]{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t}} \left| 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right|^{\frac{1}{8}} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} dr \quad (4.16)$$

Після інтегрування отримуємо:

$$M_1 = a \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{(R_{H_0} - V_0 t)^2}{2} - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)^3}{3 \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} - \frac{5 \cdot (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{6} \right)$$

$$M_2 = -a \frac{2}{\sqrt{3}} \left( (R_{H_0} - V_0 t) \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)^2}{2} - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{2} \right)$$

$$M_3 = 2 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t) \left( \frac{\left( \sqrt{1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}}} \right)^5}{5} - \frac{\left( \sqrt{1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}}} \right)^3}{3} \right)$$

$$M_4 = b \cdot \frac{3}{2} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t) \cdot \sqrt{\left( 1 - \frac{R_{H_0} - V_0 t}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right)^3}$$

$$M_5 = 4 \cdot c \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t) \cdot \left( \frac{\sqrt[4]{\left( 1 - \frac{R_{H_0} - V_0 t}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right)^5}}{9} + \frac{\sqrt[4]{\left( 1 - \frac{R_{H_0} - V_0 t}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right)^5}}{5} \right)$$

$$M_6 = c \cdot \frac{4}{5} \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t) \cdot \sqrt[4]{\left( 1 - \frac{R_{H_0} - V_0 t}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right)^5}$$

$$M_7 = 8 \cdot d \cdot \sqrt[8]{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t) \cdot \left( \frac{\sqrt[8]{\left( 1 - \frac{R_{H_0} - V_0 t}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right)^{17}}}{17} - \frac{\sqrt[4]{\left( 1 - \frac{R_{H_0} - V_0 t}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right)^9}}{9} \right)$$

$$M_8 = \frac{8}{9} \cdot d \cdot \sqrt[8]{\frac{2}{\sqrt{3}}} \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} \cdot \left( -\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} \cdot \sqrt[8]{\left( 1 - \frac{R_{H_0} - V_0 t}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \right)^9} \right)$$

$$M_9 = A \frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t} \left( \frac{(R_{H_0} - V_0 t)^2}{2} - (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t) \cdot \ln(R_{H_0} - V_0 t) - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{2} + (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t) \cdot \ln(\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}) \right)$$

$$M_{10} = -A \frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t} \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} \left( (R_{H_0} - V_0 t) + (R_{B_0} - V_0 t) - 2\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} \right)$$

$$M_{11} = B \cdot \frac{1}{2} \sqrt[8]{\frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t}} \left( (R_{H_0} - V_0 t) \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)^2 - (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} - (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t) \cdot \ln \left| (R_{H_0} - V_0 t) + \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)^2 - (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} \right| + \right.$$

$$\left. + (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t) \cdot \ln \left| \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} \right| \right)$$

$$\begin{aligned}
M_{12} = & -B \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t}} \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} \cdot (\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)^2 - (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} - (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)) \cdot \frac{1}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} \cdot \\
& \arctg \frac{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)^2 - (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}}) \\
M_{13} = & C \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t}} \cdot (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t) \cdot \\
& \left( \frac{\sqrt{1 - \frac{(R_{B_0} - V_0 t)}{(R_{H_0} - V_0 t)}}}{8 \left( \sqrt{1 - \frac{(R_{B_0} - V_0 t)}{(R_{H_0} - V_0 t)}} + 1 \right)} - \frac{1}{2} \arctag \left( \sqrt{1 - \frac{(R_{B_0} - V_0 t)}{(R_{H_0} - V_0 t)}} \right) - \frac{1}{16 \left( \sqrt{1 - \frac{(R_{B_0} - V_0 t)}{(R_{H_0} - V_0 t)}} + 1 \right)} - \frac{1}{4} \ln \left( \sqrt{1 - \frac{(R_{B_0} - V_0 t)}{(R_{H_0} - V_0 t)}} + 1 \right) - \right. \\
& \left. - \frac{1}{16 \left( \sqrt{1 - \frac{(R_{B_0} - V_0 t)}{(R_{H_0} - V_0 t)}} - 1 \right)} + \frac{1}{16} \ln \left( \sqrt{1 - \frac{(R_{B_0} - V_0 t)}{(R_{H_0} - V_0 t)}} - 1 \right) + \frac{1}{4} \ln \left( \sqrt{1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}} + 1 \right) - \frac{1}{16} \ln(-1) \right) \\
M_{15} = & D \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t}} \cdot (R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t) \left( \frac{1}{64} \ln(2) + \right. \\
& \left. + \frac{1}{32} \arctag(1) + \frac{1}{16} \arctag(1) - \left( \frac{1}{4\sqrt{2}} + \frac{3\sqrt{2}}{32} \right) \ln \frac{2+\sqrt{2}}{2-\sqrt{2}} - \left( \frac{1}{2\sqrt{2}} + 6\sqrt{2} \right) \arctg(\sqrt{2}+1) + \left( \frac{1}{2\sqrt{2}} + 6\sqrt{2} \right) \arctg(\sqrt{2}-1) \right)
\end{aligned} \tag{4.17}$$

Спростимо вирази:

$$\begin{aligned}
x &= R_{H_0} - V_0 t ; \\
y &= R_{B_0} - V_0 t ; \\
z &= \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)} ; \\
p &= \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t} ; \\
k &= \frac{R_{B_0} - V_0 t}{R_{B_0} - V_0 t} ;
\end{aligned} \tag{4.18}$$

Отримуємо рівняння моментів:

$$\begin{aligned}
M_1 &= a \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3 \cdot z} - \frac{5 \cdot xy}{6} \right) \\
M_2 &= -a \frac{2}{\sqrt{3}} \left( x \cdot z - \frac{x^2}{2} - \frac{x \cdot y}{2} \right) \\
M_3 &= 2 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot x \cdot y \cdot \left( \frac{\left( \sqrt{1 - \frac{x}{z}} \right)^5}{5} - \frac{\left( \sqrt{1 - \frac{x}{z}} \right)^3}{3} \right) \\
M_4 &= b \cdot \frac{3}{2} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot x \cdot y \cdot \sqrt{\left( 1 - \frac{x}{z} \right)^3}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_5 &= \frac{56}{45} \cdot c \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot x \cdot y \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{x}{z}\right)^5} \\
M_6 &= c \cdot \frac{4}{5} \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot x \cdot y \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{x}{z}\right)^5} \\
M_7 &= 8 \cdot d \cdot \sqrt[8]{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot x \cdot y \cdot \left( \frac{\sqrt[8]{\left(1 - \frac{x}{z}\right)^{17}}}{17} - \frac{\sqrt[4]{\left(1 - \frac{x}{z}\right)^9}}{9} \right) \\
M_8 &= -\frac{8}{9} \cdot d \cdot \sqrt[8]{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot z^2 \cdot \sqrt[8]{\left(1 - \frac{x}{z}\right)^9} \\
M_9 &= A \frac{2}{3} \cdot p \left( \frac{x^2}{2} - x \cdot y \cdot \ln x - \frac{x \cdot y}{2} + x \cdot y \cdot \ln z \right) \\
M_{10} &= -A \frac{2}{3} \cdot p \cdot z \cdot (x + y - 2 \cdot z) \\
M_{11} &= B \cdot \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} p \cdot (x \cdot \sqrt{x^2 - x \cdot y} - x \cdot y \cdot \ln |x + \sqrt{x^2 - x \cdot y}| + x \cdot y \cdot \ln |z|) \\
M_{12} &= -B \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} p \cdot z \cdot (\sqrt{x^2 - x \cdot y} - x \cdot y \cdot \frac{1}{z} \cdot \arctg \frac{\sqrt{x^2 - x \cdot y}}{z}) \\
M_{13} &= C \cdot 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{3}} p \cdot x \cdot y \cdot \left( \frac{\sqrt[4]{1-k}}{8(\sqrt[4]{1-k}+1)} - \frac{1}{2} \arctag(\sqrt[4]{1-k}) - \frac{1}{16(\sqrt[4]{1-k}+1)} - \frac{1}{4} \ln(\sqrt[4]{1-k}+1) - \frac{1}{16(\sqrt[4]{1-k}-1)} + \frac{1}{16} \ln(\sqrt[4]{1-k}-1) + \frac{1}{4} \ln(2) \right) \\
M_{15} &= D \cdot 4 \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{3}} p \cdot x \cdot y \cdot \left( \frac{1}{64} \ln(2) + \frac{1}{32} \arctag(1) + \frac{1}{16} \arctag(1) - \left( \frac{1}{4\sqrt{2}} + \frac{3\sqrt{2}}{32} \right) \ln \frac{2+\sqrt{2}}{2-\sqrt{2}} - \left( \frac{1}{2\sqrt{2}} + 6\sqrt{2} \right) \arctg(\sqrt{2}+1) + \left( \frac{1}{2\sqrt{2}} + 6\sqrt{2} \right) \arctg(\sqrt{2}-1) \right)
\end{aligned} \tag{4.19}$$

Враховуючи рівняння (4.19) отримуємо наступне рівняння моменту (4.14):

$$\begin{aligned}
M &= 2 \cdot (a \cdot (M_1 + M_2) + b \cdot (M_3 + M_4) + c \cdot (M_5 + M_6) + d \cdot (M_7 + M_8) + \\
&+ A \cdot (M_9 + M_{10}) + B \cdot (M_{11} + M_{12}) + C \cdot (M_{13}) + D \cdot (M_{15}))
\end{aligned} \tag{4.20}$$

Для знаходження невідомих  $a, b, c, d, A, B, C, D$  необхідно вирішити систему з 8 рівнянь для різних інтервалів часу:

$$\begin{cases}
M = 2 \cdot (a \cdot (M_1 + M_2)_1 + b \cdot (M_3 + M_4)_1 + c \cdot (M_5 + M_6)_1 + d \cdot (M_7 + M_8)_1 + \\
+ A \cdot (M_9 + M_{10})_1 + B \cdot (M_{11} + M_{12})_1 + C \cdot (M_{13})_1 + D \cdot (M_{15})_1) \\
\ldots \\
M = 2 \cdot (a \cdot (M_1 + M_2)_8 + b \cdot (M_3 + M_4)_8 + c \cdot (M_5 + M_6)_8 + d \cdot (M_7 + M_8)_8 + \\
+ A \cdot (M_9 + M_{10})_8 + B \cdot (M_{11} + M_{12})_8 + C \cdot (M_{13})_8 + D \cdot (M_{15})_8)
\end{cases} \tag{4.21}$$

Розрахункові величини  $V_0, R_H, R_B$  для моменту в рівнянні (4.14) визначаються експериментально. В рівняннях (4.21) величина моменту згину  $M$  визначається експериментально від часу деформування.

#### 4.1.4. Отримання визначальних рівнянь спрощеної моделі в'язкопластичного матеріалу

Для практичного використання система рівнянь (4.21) занадто трудомістка. Для умов ізотермічного деформування модель в'язкопластичного матеріалу можна спростити.

Приймаємо припущення, що при ізотермічному гарячому деформуванні величина опору деформаціям  $\sigma_i$  не залежить від ступеня деформації при постійній швидкості деформацій. Властивості матеріалу близькі до ідеального пластичного матеріалу. Тоді вираз (4.3) набуває вигляду:

$$\sigma_i = A \cdot \varepsilon_i + B \cdot \varepsilon_i^{1/2} + C \cdot \varepsilon_i^{1/4} + D \cdot \varepsilon_i^{1/8}, \quad (4.22)$$

де  $\varepsilon_i$  - інтенсивність швидкостей деформацій,  $e_i$  - інтенсивність деформацій.

Інтенсивність напруження  $\sigma_i$  має зв'язок з інтенсивністю швидкостей деформації  $\varepsilon_i$  функціонально та описується кривою деформування – модель матеріалу.

Враховуючи рівняння (4.7), (4.8), (4.9), (4.12) апроксимуюча крива деформування (4.22) має вид:

$$\begin{aligned} \sigma_i = & A \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 \cdot t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t) \cdot (R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right] + \\ & + B \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 \cdot t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t) \cdot (R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right] \right)^{1/2} + \\ & + C \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 \cdot t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t) \cdot (R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right] \right)^{1/4} + \\ & + D \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 \cdot t} \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t) \cdot (R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right] \right)^{1/8} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Момент внутрішніх сил відносно центру кривизни з врахуванням рівняння (4.23), має вид:

$$\begin{aligned}
M &= 2 \int_{\rho}^{R_H} \sigma \cdot (r - \rho) dr = 2 \int_{\rho}^{R_H} (A \cdot \varepsilon + B \cdot \varepsilon^{1/2} + C \cdot \varepsilon^{1/4} + D \cdot \varepsilon^{1/8}) \cdot (r - \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}) dr = \\
&= 2 \left( \int_{\rho}^{R_H} A \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \cdot \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right] \cdot r dr - \right. \\
&\quad - \int_{\rho}^{R_H} A \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \cdot \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right] \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)} dr + \\
&\quad + \int_{\rho}^{R_H} B \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \cdot \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right]} \cdot r dr - \\
&\quad - \int_{\rho}^{R_H} B \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \cdot \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right]} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)} dr + \\
&\quad + \int_{\rho}^{R_H} C \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \cdot \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right]} \cdot r dr - \\
&\quad - \int_{\rho}^{R_H} C \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \cdot \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right]} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)} dr + \\
&\quad + \int_{\rho}^{R_H} D \cdot \sqrt[8]{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \cdot \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right]} \cdot r dr - \\
&\quad - \int_{\rho}^{R_H} D \cdot \sqrt[8]{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \cdot \left[ 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{r^2} \right]} \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)} dr \Big)
\end{aligned}
\tag{4.24}$$

Знаходимо момент який складається з 4 складових:

$$\begin{aligned}
M &= 2 \int_{\rho}^{R_H} \sigma \cdot (r - \rho) dr = 2 \int_{\rho}^{R_H} (A \cdot \varepsilon + B \cdot \varepsilon^{1/2} + C \cdot \varepsilon^{1/4} + D \cdot \varepsilon^{1/8}) \cdot (r - \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}) dr = \\
&= 2 \cdot (M_1 + M_2 + M_3 + M_4)
\end{aligned}
\tag{4.25}$$

де

$\rho = \sqrt{R_H \cdot R_B} = \sqrt{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}$  - радіус нейтральної поверхні;

$\varepsilon_i = \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2V_0 t} \left| 1 - \frac{(R_{H_0} - V_0 t)(R_{B_0} - V_0 t)}{r^2} \right|$  - інтенсивність швидкостей.

Після інтегрування отримуємо:

$$\begin{aligned}
M_1 &= A \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t} \cdot \left( \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)^2}{2} - (R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t) \cdot \ln(R_{H_0} - V_0 \cdot t) - \right. \\
&\quad - \frac{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{2} + (R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t) \cdot \ln \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)} - \\
&\quad \left. - \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)} \cdot ((R_{H_0} - V_0 \cdot t) + (R_{B_0} - V_0 \cdot t) - 2\sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_2 = & B \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t}} \cdot ((R_{H_0} - V_0 \cdot t) \cdot \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)^2 - (R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)} - \\
& - (R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t) \cdot \ln \left| (R_{H_0} - V_0 \cdot t) + \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)^2 - (R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)} \right| + \\
& + (R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t) \cdot \ln \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)} - \\
& - \sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)} \cdot (\sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)^2 - (R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)} - \\
& (R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t) \cdot \frac{1}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}} \cdot \arctan \frac{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)^2 - (R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}}{\sqrt{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}})) \\
M_3 = & 2C \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t}} \cdot (R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t) \left( \frac{\sqrt[4]{1 - \frac{(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)}}}{8 \left( \sqrt[4]{1 - \frac{(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)}} + 1 \right)} - \right. \\
& - \frac{1}{2} \operatorname{arctag} \left( \sqrt[4]{1 - \frac{(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)}} \right) - \frac{1}{16 \left( \sqrt[4]{1 - \frac{(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)}} + 1 \right)} - \frac{1}{4} \ln \left( \sqrt[4]{1 - \frac{(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)}} + 1 \right) - \\
& \left. - \frac{1}{16 \left( \sqrt[4]{1 - \frac{(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)}} - 1 \right)} + \frac{1}{16} \ln \left( \sqrt[4]{1 - \frac{(R_{B_0} - V_0 \cdot t)}{(R_{H_0} - V_0 \cdot t)}} - 1 \right) \right) \\
M_4 = & 4D \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{R_{H_0} + R_{B_0} - 2 \cdot V_0 \cdot t}} \cdot (R_{H_0} - V_0 \cdot t)(R_{B_0} - V_0 \cdot t) \left( \frac{1}{64} \ln(2) + \right. \\
& + \frac{1}{32} \operatorname{arctag}(1) + \frac{1}{16} \operatorname{arctag}(1) - \left( \frac{1}{4\sqrt{2}} + \frac{3\sqrt{2}}{32} \right) \ln \frac{2 + \sqrt{2}}{2 - \sqrt{2}} - \\
& \left. - \left( \frac{1}{2\sqrt{2}} + 6\sqrt{2} \right) \operatorname{arctg}(\sqrt{2} + 1) + \left( \frac{1}{2\sqrt{2}} + 6\sqrt{2} \right) \operatorname{arctg}(\sqrt{2} - 1) \right)
\end{aligned} \tag{4.26}$$

Для знаходження невідомих  $A, B, C, D$  необхідна вирішити систему з 4 рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} M &= 2 \cdot (M_{11} + M_{21} + M_{31} + M_{41}) \\ &\dots \\ M &= 2 \cdot (M_{14} + M_{24} + M_{34} + M_{44}) \end{aligned} \right\} \tag{4.27}$$

Розрахункові величини  $V_0, R_H, R_B$  для моменту в рівнянні (4.24) визначаються експериментально.

#### 4.1.5. Експериментальне визначення розрахункових величин

Для визначення розрахункових величин для моменту в рівнянні (4.23) були проведені експериментальні дослідження чистого згину заготовки одинарної кривизни в ізотермічних умовах. Визначалась залежність внутрішнього та зовнішнього радіусу заготовки, від моменту внутрішніх сил для кожного відрізка часу. Це дає можливість скласти та вирішити систему з чотирьох лінійних рівнянь відносно коефіцієнтів апроксимації.

Для випробувань на чистий згин були використані зразки прямокутного перерізу  $210 \times 60$  мм (рис. 4.1.) з листового титанового сплаву ВТ6 товщиною 1 мм та 1,5 мм з розміром зерна 7-12 мкм.

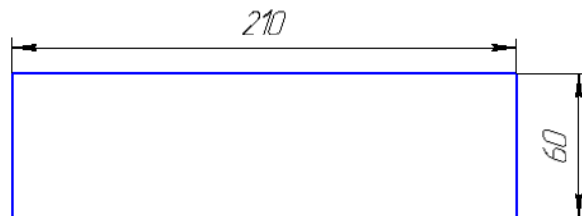


Рис. 4.1. Зразок для випробувань на згин

Зразок встановлювали на дві опори та прикладали навантаження двома рівними силами (рис. 4.2), яке зосереджене на однакових відстанях від опор та створює в середині частині заготовки (довжиною  $L$ ) чистий згин.

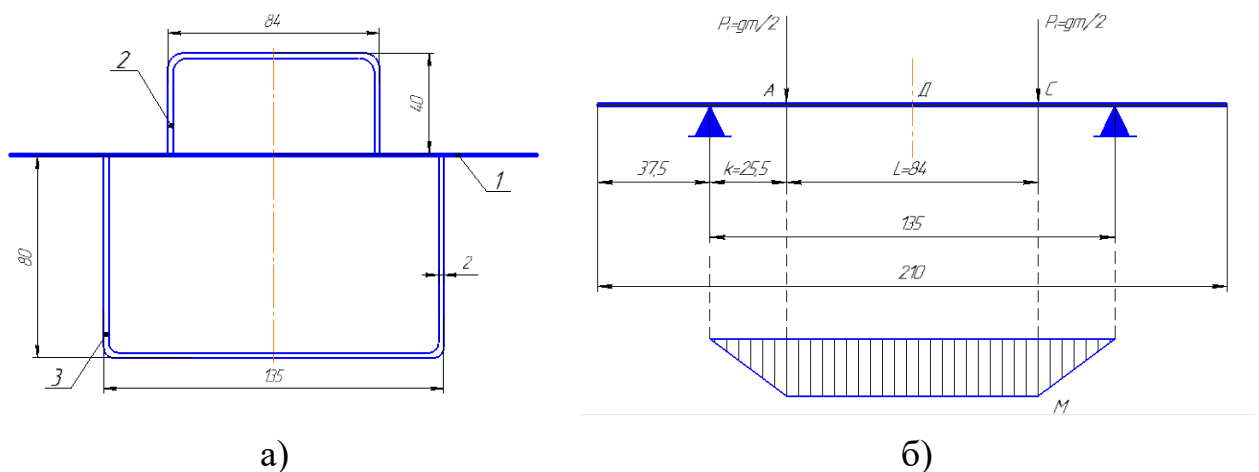


Рис. 4.2. Навантаження зразка при випробуваннях на згин:

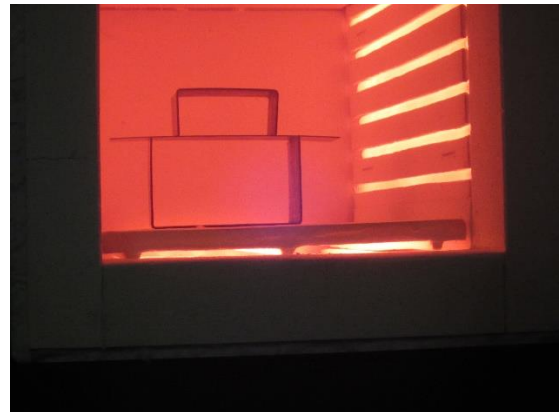
- а) схема навантаження: 1 – заготовка, 2 – прижим, 3- нижня опора;
- б) епюра моменту сил в робочій частині зразка



Заготовку 1 встановлювали на опору 3 і прижимом 2 забезпечували деформування зразка (рис. 4.3.). Ширина опори - 100мм. Опора та прижим виготовлені з нержавіючої сталі 12Х18Н9Т. Нагрівальним устаткуванням була електрична муфельна піч СНОЛ30/1300. Через певний проміжок часу фіксувався прогин зразка (рис. 4.4.).



а)



б)

Рис. 4.3. Пристрій (а) та його установка в печі (б)

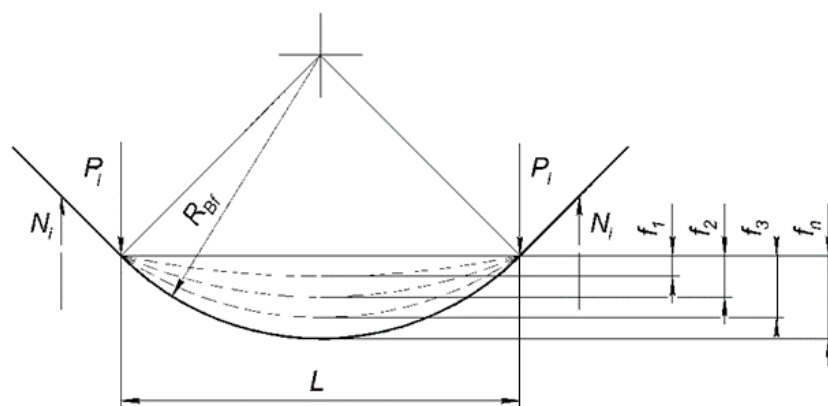


Рис. 4.4. Схема знаходження прогину

Чистий згин плоских зразків з титанового двохфазного сплаву  $(\alpha + \beta)$  ВТ6 досліджувався під дією постійної в часі сили при температурі гарячого формоутворення  $900^{\circ}\text{C}$ .

Дослідження проводилось для трьох типів зразків при умові, що температура для всіх зразків однакова, але змінювалось навантаження  $P_1 = 2.86\text{H}, P_2 = 3.3\text{H}, P_3 = 3.74\text{H}$ . Згинаюча сила  $P$  приймалась як сила ваги притискача та визначалась як маса притискача помножена на прискорення вільного падіння. Величина згинаючого моменту складає  $M_{\text{зг}1} = 36.5 \cdot 10^{-3} \text{H} \cdot \text{м}$ ,  $M_{\text{зг}2} = 42 \cdot 10^{-3} \text{H} \cdot \text{м}$ ,  $M_{\text{зг}3} = 47.7 \cdot 10^{-3} \text{H} \cdot \text{м}$ . Момент постійний для всіх перерізів між точками прикладання зусилля. Для подальших розрахунків визначали величину питомого моменту. Для цього величину згинального моменту було поділено на ширину заготовки (60мм) та отримано  $M_1 = 0.6 \frac{\text{H} \cdot \text{м}}{\text{м}}$ ,  $M_2 = 0.7 \frac{\text{H} \cdot \text{м}}{\text{м}}$ ,  $M_3 = 0.8 \frac{\text{H} \cdot \text{м}}{\text{м}}$ . Фіксували прогин через кожні 30 секунд.

На основі експериментальних даних побудовані залежності прогину  $f$  від часу, які показані на рис. 4.5.

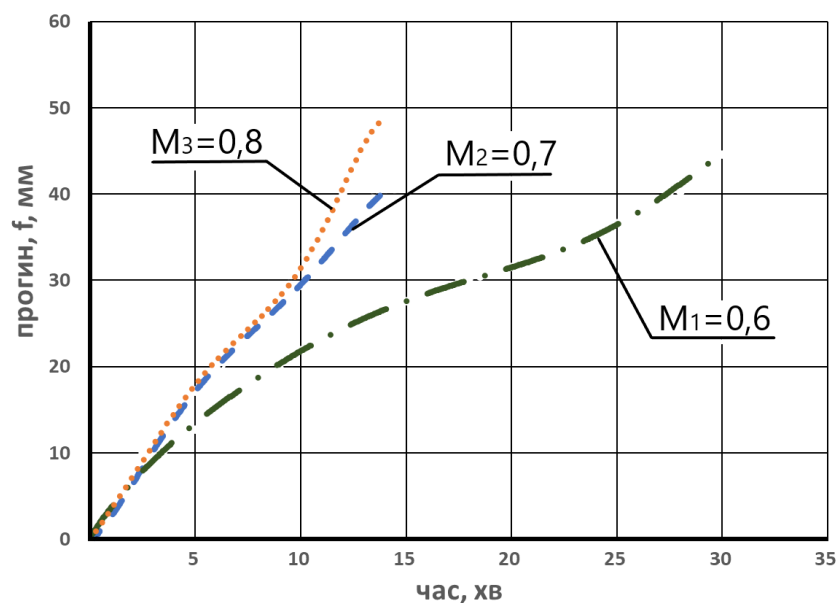


Рис. 4.5. Залежність прогину від часу для титанового сплаву ВТ6 при температурі  $900^{\circ}\text{C}$  та питомого моменту  $[\text{H} \cdot \text{м} / \text{м}]$

На основі отриманих залежностей визначається радіус внутрішньої кривизни заготовки із геометричних співвідношень (рис. 4.6.)

$$R_{Bt} = \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + f^2}{2f} = \frac{1764 + f^2}{2f}, \text{ де } f - \text{величина прогину.}$$

Радіус зовнішньої кривизни знаходили з рівняння  $R_{zt} = R_{et} + \delta$ , де  $\delta$  - товщина матеріалу, величина  $\delta = 1,5 \text{ мм}$  постійна,  $R_{et}$  - радіус внутрішньої кривизни, величина якого залежить від часу.

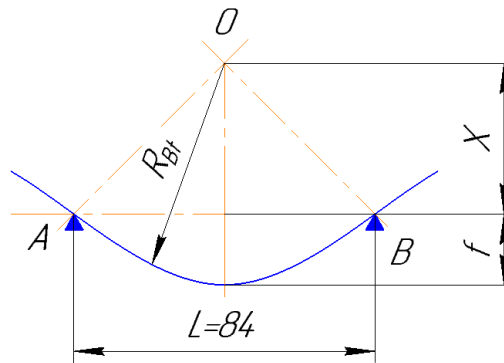


Рис. 4.6. Знаходження геометричних параметрів

Знаходимо радіус  $R_{Bt}$  та  $R_{zt}$  для кожної точки часу. На основі отриманих даних побудовано графік залежності радіусу кривизни внутрішньої поверхні заготовки від часу (рис. 4.7).

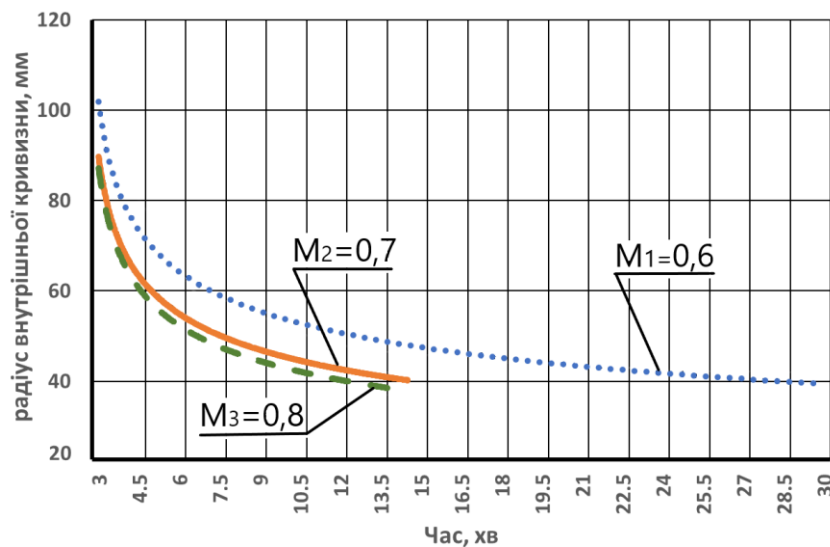


Рис. 4.7. Залежність внутрішнього радіусу від часу для титанового сплаву ВТ6 при температурі  $900^{\circ}\text{C}$  та питомого моменту  $[H \cdot m/m]$

Знаходимо швидкість зміни внутрішнього радіусу кривизни заготовки за формулою:

$$V_0 = \frac{R_0 - R_{\text{вн}}}{\Delta t} \quad (4.28)$$

де  $\Delta t$  - проміжок часу, за який фіксували зміну радіусу,  $R_{\text{вн}}$  - радіус внутрішньої кривизни в даний момент часу,  $R_0 = 200 \text{ мм}$  - початковий радіус кривизни, який приймаємо довільно, в межах інтервалу пружній деформації.

#### 4.1.6. Побудова моделей в'язкопластичного матеріалу для титанового сплаву ВТ6

Для знаходження невідомих коефіцієнтів  $A, B, C, D$  необхідно вирішити систему, яка складається з чотирьох невідомих рівнянь. Для кожного зразка вибираємо чотири довільних точок із графіку залежності внутрішнього радіусу. Розв'язавши систему матричним методом отримано коефіцієнти апроксимації  $A, B, C, D$  для кожного зразка. З врахуванням (4.3.) отримано наступні залежності напружень від швидкостей деформацій для моментів:

$$\text{При } M_1 = 0.6 \frac{H \cdot M}{M}$$

$$\sigma_i = 8099327607 \cdot \varepsilon - 238930164 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}} - 2834765 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{4}} + 12553958 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{8}}$$

$$\text{При } M_2 = 0.7 \frac{H \cdot M}{M}$$

$$\sigma_i = 6513324400 \cdot \varepsilon - 224058360 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}} - 6252792 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{4}} + 14589846 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{8}}$$

$$\text{При } M_3 = 0.8 \frac{H \cdot M}{M}$$

$$\sigma_i = 4539779820 \cdot \varepsilon - 66556918 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}} - 24803428 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{4}} + 15435251 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{8}}$$

Графічно отримані залежності показано на рис. 4.8. Співставлення кривих для різних моментів навантаження показують, що:

- якісно характер поведінки кривих для умов деформування, що розглядали, для сплаву ВТ6 однаковий;

- похибка визначення інтенсивності напружень в діапазоні швидкостей деформацій  $10^{-3} \dots 10^{-4} (c^{-1})$  не перевищує 10...14%.

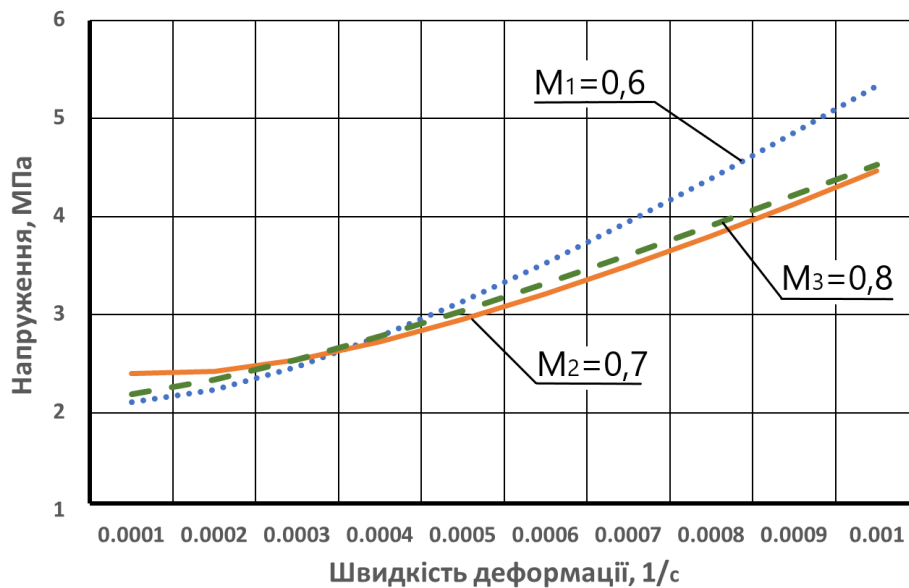


Рис. 4.8. Залежність напружень від швидкості деформацій для титанового сплаву ВТ6 при температурі 900°C та питомого моменту  $[H \cdot m / m]$

Для підтвердження коректності методу використання досліджувалось на побудові моделі сплаву ВТ6 для заготовок різних товщин. Був проведений експеримент для титанового сплаву ВТ6 товщиною 1мм з питомим моментом  $M_1 = 0.6 \frac{H \cdot m}{m}$ . Згідно запропонованого метода визначена модель матеріалу. Співставлення графіків залежності напруження від швидкості деформації для заготовок ВТ6 товщиною 1мм та 1,5мм показана на рис. 4.9.

Максимальна похибка в місці найбільшої різниці між графіками складає 15%. Таким чином можемо дійти до висновку, що товщина матеріалу незначно впливає на в'язкопластичну модель деформування.

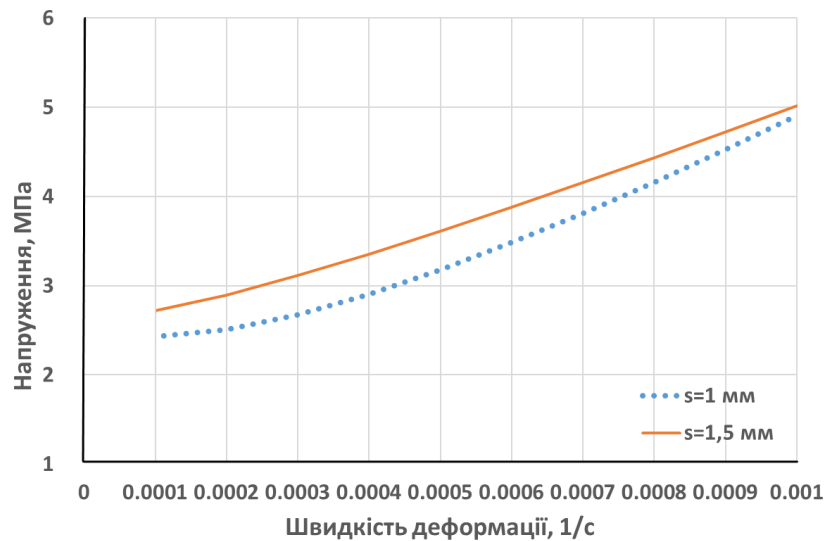


Рис. 4.9. Залежність напружень від швидкості деформацій для титанового сплаву ВТ6 для товщини 1мм та 1.5мм при температурі 900<sup>0</sup>С та питомого моменту  $M_1 = 0.6 \frac{H \cdot m}{m}$

Для підтвердження коректності отриманих в'язкопластичних моделей для титанового сплаву ВТ6 було проведено порівняння з даними, які використовуються в науковій практиці. Для цього в якості порівняння були використані властивості матеріалу *Ti-6Al-4V* (закордонний аналог ВТ6) з бази даних програмного комплексу Deform-3D, результати моделювання якого визнають більшість країн світу. На рис. 4.10. дано порівняння моделей.

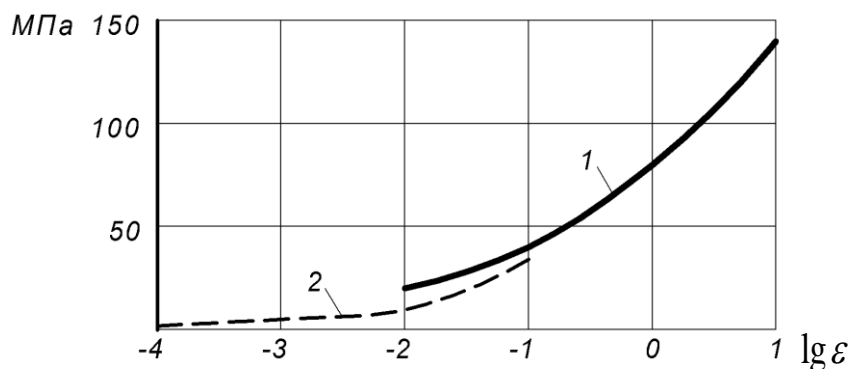


Рис. 4.10. Порівняння залежності напруження опору деформації титанового сплаву ВТ6 від логарифму швидкості деформацій для: 1 – по даним Deform 3D, 2 – за результатами розрахунку за запропонованим методом

На границі з'єднання кривих похибка – 16-18%. Крива залежності  $\sigma(\varepsilon)$  по даним Deform в порівнянні з отриманими залежностями по розробленому методу, дозволили зробити оцінку похибки в інтервалі 16-20%. По характеру поведінки кривих отриманих по розробленій методиці залежність доповнює залежність, яка побудована по даним Deform та її продовжує.

## **4.2. Визначення граничного значення (величини) деформівності титанових сплавів в умовах в'язкопластичного формоутворення**

### **4.2.1. Особливості використання критерію руйнування Кокрофта-Летема при в'язкопластичному формоутворенні**

Граничне значення деформівності металів і сплавів визначає можливості формоутворення деталей і конструкцій до руйнування методами пластичних деформацій.

В аналітичному огляді наукових публікацій розглянуто і систематизовано кількість моделей руйнування, серед яких найбільше поширення отримали критерії руйнування, що використовуються в програмних комплексах. В дисертаційній роботі розглянуті критерії руйнування, що використанні в програмному комплексі Deform 3D [184-190], який оснований на методі кінцевих елементів.

При моделюванні в спеціалізованому програмному комплексі Deform 3D представлено використання ряду критеріїв руйнування (Cockcroft-Latham, Brozzo, Ayada та інших).

Класичний критерій Кокрофта-Летема оснований на енергетичних принципах руйнування. Його модифікація – Normalized Cockcroft – Latham.

Класичний критерій Cockcroft-Latham оснований на енергетичних принципах руйнування – критичному значенні енергії деформації на одиницю об'єму:

$$\int_0^{\bar{e}_p} \sigma_1 de_p \leq c, \quad (4.29)$$

де  $de_p$  - прирощення накопиченої пластичної деформації,  $\sigma_1$  - максимальне головне напруження ( $\sigma_1 > 0$  - розтягуючі напруження),  $c$  - граничне значення питомої роботи (енергії дислокації) максимального розтягуючого (головного) напруження.

Енергетичні критерії дозволяють достатньо точно оцінювати вірогідність руйнування твердих суцільних тіл при монотонних процесах пластичного деформування з відносно складною траєкторією деформації.

Підвищення складності траєкторії деформацій можливо при переході від розгляду деформацій до розгляду швидкостей деформацій тоді співвідношення (4.29) буде мати наступний вид:

$$\int_0^{\bar{e}_p} (\sigma_1 \varepsilon) dt \leq c \quad (4.30)$$

При використанні критеріїв моменту руйнування матеріалу відповідає певне значення питомої (роботи) енергії, при досягненні якої матеріал руйнується граничного (критичного) значення:

$$c_p = c_{kp} \quad (4.31)$$

Величина граничного значення критерію, як правило, визначається експериментально і може змінюватись в широкому діапазоні в залежності від схеми напруженого стану.

Для врахування впливу компонент тензора напружень в подальшому критерій (4.29) був модифікований шляхом введення відносної величини максимального головного напруження до інтенсивності напружень  $\sigma_i$  (величини, що пропорційне другому інваріанту тензора напружень). Це дозволило перетворити критерій Cockcroft – Latham із енергетичного в деформаційний:

$$\int_0^{\bar{e}_p} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} de_p < e_{fs}, \quad (4.32)$$

де  $e_{fs}$  - граничне значення накопиченої пластичної деформації.



Цей критерій руйнування отримав назву Normalized Cockcroft – Latham. В такому вигляді він використаний в програмному комплексі Deform 3D.

В дисертації врахована особливість визначенні величини граничної накопиченої пластичної деформації, що враховує показник жорсткості схеми напруженого стану. Як це зроблено в нормалізованому критерії руйнування Кокрофта-Летема –Оха [191]:

$$\bar{e}_{fs}(\eta) = \frac{\bar{e}_{fs}}{(\eta + 2 \cdot \cos[\frac{1}{3} \cdot \arccos(0,5 \cdot \eta \cdot (3 - \eta^2))])} \quad (4.33)$$

при  $-1 \leq \eta \leq 2$ , де  $\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_n}$  - показник жорсткості напруженого стану.

#### **4.2.2 Експериментальне визначення граничної величини накопиченої пластичної деформації при формоутворенні мембрани з листового матеріалу**

Формоутворення зразків з титанового сплаву ОТ4-0 в ізотермічних умовах проводилося в діапазоні температур 820 ... 850 ° С з кроком 10 ° С та зміни тиску аргону в межах 0,01 до 0,5 МПа (рис. 4.11.). Для розігріву заготовки проводили витримку в печі від 25 до 45 хв. Глибина мембрани в часі визначалося по переміщенню штока 6 і 8 (рис. 3.4). Протягом експерименту, через кожну хвилину фіксували глибину мембрани. На основі даних були побудовані залежності глибини формоутворення мембрани від часу та тиску, систематизовані та порівняні значення залежності глибини від зміни параметрів.

Глибина мембрани під дією постійного тиску газового середовища зростає (рис. 4.12, а) в часі. На кривій формоутворення мембрани можна виділити три етапи. На першому етапі формоутворення характерна інтенсивна зміна глибини мембрани від часу. На другому етапі формоутворення (зона стійкого процесу) швидкість зміни глибини постійна. На третьому етапі виникає локалізація деформації в центральній області купола мембрани. При досягненні відносної глибини  $f/b \geq 1$  деформація різко зростає, досягаючи при 10-20 хв великих

значень глибини. Вид отриманих кривих схожий на криві короткочасної повзучості. При  $840^{\circ}$  та  $850^{\circ}$  криві глибини від часу більш стрімкіше йдуть вгору (рис. 4.12, а).



$T=820^{\circ}$ ;  $p=0.3\text{MPa}$



$T=830^{\circ}$



$T=840^{\circ}$ ;  $p=0.3\text{MPa}$



$T=850^{\circ}$ ;  $p=0.3\text{MPa}$

Рис.4.11. Форма мембрани в залежності від технологічних параметрів для титанового сплаву ОТ4-0

Глибина мембрани в діапазоні температур 820 ... 850 °С збільшувалася з 59 до 63,5 мм (рис. 4.12, б). В зазначеному діапазоні ізотермічних температур зберігається однорідне формозміна купола оболонки з титанового сплаву ОТ4-0.

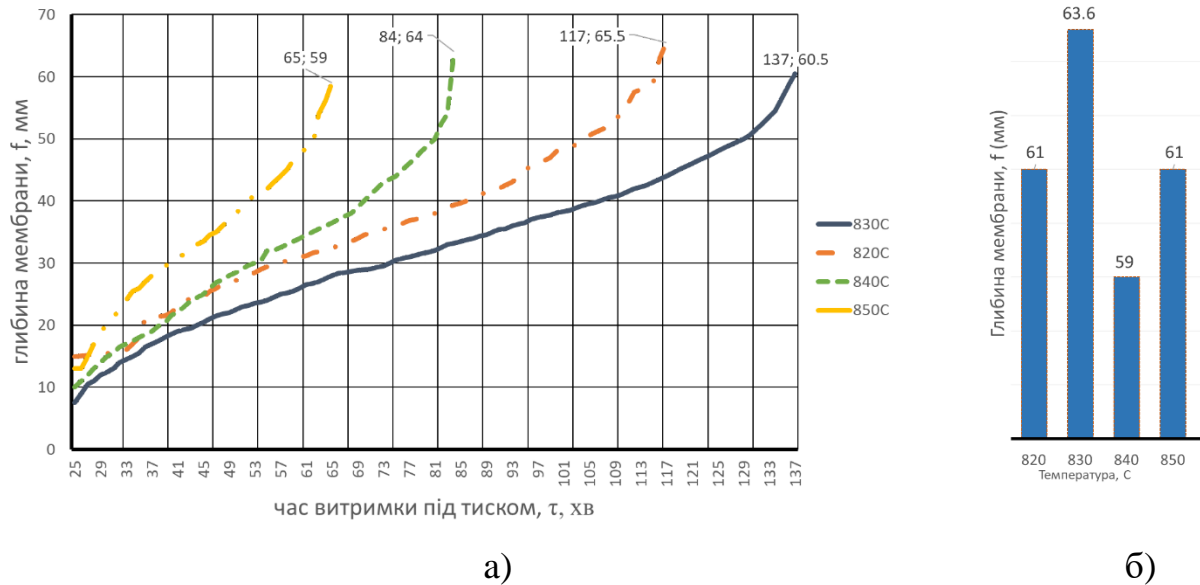


Рис. 4.12. Залежність глибини мембрани від часу витримки заготовки під постійним тиском при різних температурах деформування (а) та максимальна глибина формоутворення мембрани в залежності від температури (б)

Товщина сферичної оболонки з титанових сплавів при вільному формоутворенні внутрішнім тиском в умовах надпластичності є нерівномірною, яка від защемлення до купола оболонки зменшується, спостерігається істотне потоншення стінки оболонки до вершини купола (рис. 4.13).

Максимальна деформація потоншення стінки куполу мембрани співпадає з віссю його симетрії та визначається відомою залежністю для логарифмічних деформацій  $e_3 = \ln s/s_0$ , де  $s$ ,  $s_0$  - відповідно товщини після та до деформації.

Дослідженням процесу встановлено, що руйнування виникає в місці максимальних деформацій – в центрі мембрани. На рис. 4.14 показана залежність максимальної деформації потоншення в момент руйнування від температури ізотермічного формоутворення при постійному тиску. Результати

отримані для температур  $820^{\circ}\text{C}$ ,  $830^{\circ}\text{C}$ ,  $840^{\circ}\text{C}$ ,  $850^{\circ}\text{C}$  на основі експериментальних досліджень не менше ніж для п'ятих зразків.

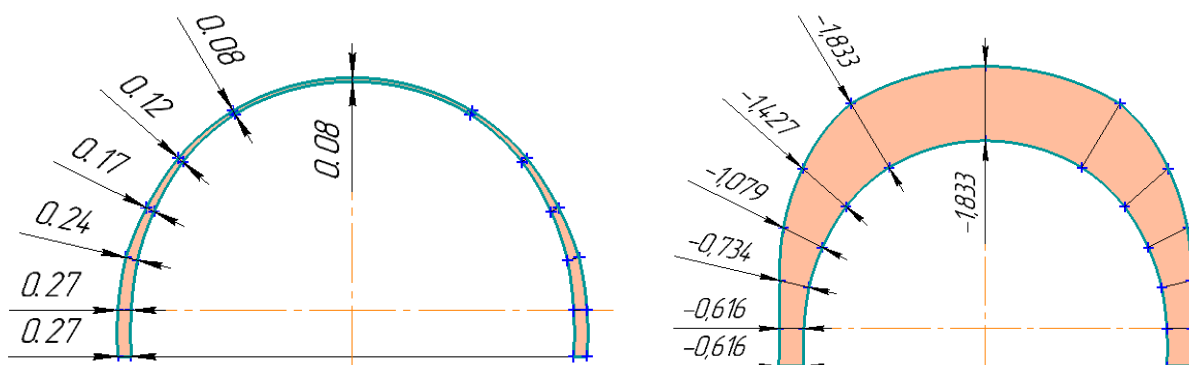


Рис. 4.13. Розподіл товщин та деформацій потоншення по твірній в меридіональному перерізі мембрани

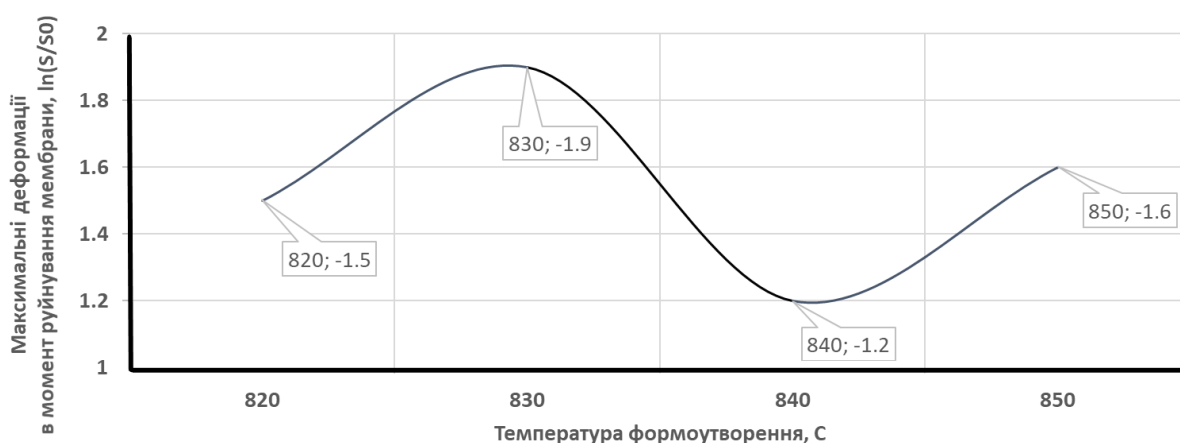


Рис. 4.14. Максимальні деформації в момент руйнування мембрани в залежності від температури для титанового сплаву OT4-0

В інтервалі температур поліморфних перетворень титанового сплаву OT4-0 максимальні деформації в момент руйнування в центрі при температурі  $830^{\circ}\text{C}$  дорівнюють -1,9. При температурі  $840^{\circ}\text{C}$  - найменша глибина формоутворення та максимальні деформації в центрі мембрани складають -1,2. При температурі  $820^{\circ}\text{C}$  та  $850^{\circ}\text{C}$  глибина формоутворення та максимальні деформації в центрі мембрани однакові.

Мікроструктура мембран після формоутворення ідентична: є зерна  $\alpha$ -фази з невеликою кількістю  $\beta$ -фази - характерна для сплаву ОТ4-0, відпаленого при температурах в  $\alpha + \beta$ -області. Розміри мікрозерен у всіх зразках знаходяться в межах 10 ... 20 мкм. На поверхні всіх зразків виявлено альфірований шар глибиною 2 ... 7 мкм.

Підвищення граничного значення накопиченої деформації стінки супроводжується руйнуванням металу в вершині купола. Зовнішній аналіз отриманих мембран показав, що розриви у всіх випадках були у вигляді тріщин, які розташовані в місці максимального потоншення стінок мембрани.

Максимальну глибину оболонки при гарячої деформації можна отримати за допомогою регулювання тиску газу і швидкості деформації. При цьому відбувається зменшення округлості оболонки. Максимальний прогин 63,5 мм при 830°C, час формоутворення 113 хв, глибина альфірованого шару 4 мкм. Найменша глибина мембрани – 59 мм при температурі 840°C. Така різка зміна глибини формоутворення пояснюється поліморфними перетвореннями, оскільки температура неповного відпалу для титанового сплаву ОТ4-0 в діапазоні 820-850°C. Час витримки впливає на величину прогину.

При пластичній деформації мембрани з титанових сплавів внутрішнім тиском в умовах надпластичності спостерігається нерівномірне зміна товщини стінки, мінімальні значення якої знаходяться біля вершини купола, де мають місце максимальні напруження.

Металографічні дослідження показали, що середній розмір структурних складових 15 мкм. Найбільша глибина альфірованого шару складає 20 мкм у зразка з найбільшим часом формоутворення при 820°C.

Проведений комплекс експериментальних досліджень формування титанових сплавів в умовах надпластичності є основоположним при розробці технологічного процесу виготовлення порожнистих лопаток вентилятора авіаційного газотурбінного двигуна.

### 4.3. Висновки до розділу 4

1. Розроблено метод експериментально - аналітичної побудови кривих деформування на основі випробувань на згин. Метод доцільно використовувати для важкодеформуємих матеріалів, а також матеріалів з обмеженою пластичністю. Отримані в'язкопластичні моделі матеріалу можуть бути використані для розрахунку різних операцій формоутворення, ґрунтуючись на гіпотезі про єдину криву.

2. В основу методу покладено вирішення системи рівнянь рівноваги моментів внутрішніх та зовнішніх сил при чистому згині заготовок. Рівняння для знаходження лінійних коефіцієнтів апроксимації кривої деформування, що описують в'язкопластичну модель матеріалу, отримані теоретично на основі кінематичної моделі чистого згину, яка зв'язує геометричні параметри заготовки з компонентами тензора швидкостей деформацій матеріалу заготовки та часом її деформування.

3. Розроблена експериментальна методика деформування заготовки в ізотермічних умовах гарячої пластичної деформації під дією постійного моменту сил та експериментально визначені залежності зміни внутрішнього радіусу заготовки від часу для титанового сплаву ВТ6 та питомих моментів  $M_1 = 0,6$ ;  $M_2 = 0,7$  та  $M_3 = 0,8$  [ $\frac{H \cdot m}{m}$ ]. Отримані залежності дозволили визначити швидкості зміни внутрішнього радіусу кривизни заготовки для умов деформування.

4. З використанням отриманих експериментальних даних вирішена система з чотирьох рівнянь рівноваги матричним методом та отримана залежність напружень від швидкостей деформацій для титанового сплаву ВТ6 при температурі деформування 900 °С та зазначених питомих моментів.

Співставлення кривих для різних моментів навантаження показують:

- якісно характер поведінки кривих однаковий;
- похибка визначення інтенсивності напружень в діапазоні швидкостей деформацій  $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  не перевищує 10...14 %.

Показано також, що максимальна похибка в залежності від товщини заготовки в діапазоні товщин 1,0...1,5 мм не перевищує 15 %.

5. Порівняння результатів розрахунку з відомими даними, що використовуються в програмному комплексі Deform 3D для титанового сплаву Ti-6Al-4V (закордонний аналог ВТ6), показало:

- по характеру поведінки кривих, отриманих за розробленим методом, вони доповнюють залежності побудовані по даним бібліотеки Deform 3D;

- максимальна похибка лежить в інтервалі 14...16 %.

6. Результати дослідження показали, що криві в'язкопластичного деформування цих матеріалів, можна використовувати для розрахунку технологічних процесів.

7. Запропоновано для оцінки граничної величини накопиченої пластичної деформації для ізотермічних умов деформування в критерії руйнування Кокрофта-Латема-Оха, використання результатів експериментального формоутворення мембрани з листового матеріалу з показником жорсткості схеми напруженого стану +2 в центрі заготовки. Для відповідних температурних та швидкісних умов деформування експериментально встановлено, що максимальна величина пластичних деформацій для титанових сплавів відповідає інтервалу температур поліморфних перетворень.

## **5. Розрахунок формоутворення порожнистої лопатки чисельними методами**

### **5.1. Постановка задачі**

Чисельний розрахунок процесу формоутворення фрагменту порожнистої лопатки виконано з використанням CAD/CAE DEFORM-2D.

У розрахунку процесу прийняті наступні припущення:

- фрагмент лопатки розглядався постійного перерізу, який не залежить від поздовжньої (осьової) координати;
- механічні властивості матеріалу заготовки титанового сплаву BT6 задавались в'язкопластичною моделлю, що отримана в розділі 4.1. та узгоджена з моделлю бази даних DEFORM (див. рис. 4.10) для температури деформування;
- граничне значення деформівності титанового сплаву заготовки в умовах в'язкопластичного формоутворення визначалось на основі критерію руйнування Летема-Кокрофта та задавалось на основі експериментальних даних, отриманих в розділі 4.2.2;
- матеріал оснащення для формоутворення фрагменту порожнистої лопатки вважався абсолютно твердим;
- вважалось, що деформування пакету заготовок реалізується за рахунок внутрішнього тиску, прикладеного рівномірно до обшивок порожнистої лопатки. Величина тиску змінювалась в межах від 1,0 до 3,0 атм.

Моделі інструмента, тобто дві матриці які формують створені в Solid Works і імпортовані в форматі \*.STL (рис. 5.1.).

Моделювання процесу формоутворення фрагменту порожнистої лопатки виконано з титанового сплаву BT6.

Кінцева елементна модель складається з 2940 кінцевого елементу, має 3437 вузла. Розподільне навантаження прикладається до по всій внутрішній поверхні обшивки (рис. 5.2.).



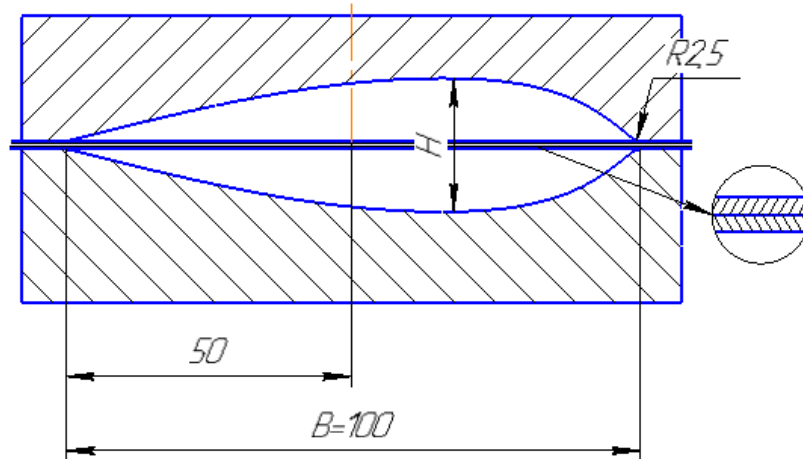


Рис. 5.1. Габаритні розміри порожнини для формоутворення фрагменту порожнистої лопатки

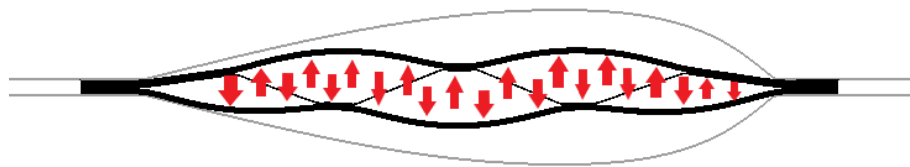


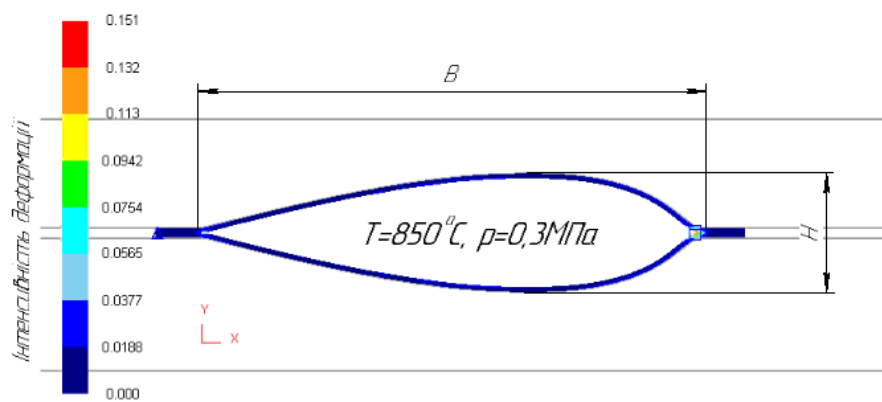
Рис. 5.2. Схема прикладання навантаження

Моделювався процес ізотермічного формоутворення, температура постійна  $920^{\circ}\text{C}$ . Величина тиску формоутворюючого середовища складала  $0.3\text{ MPa}$  (3 атм).

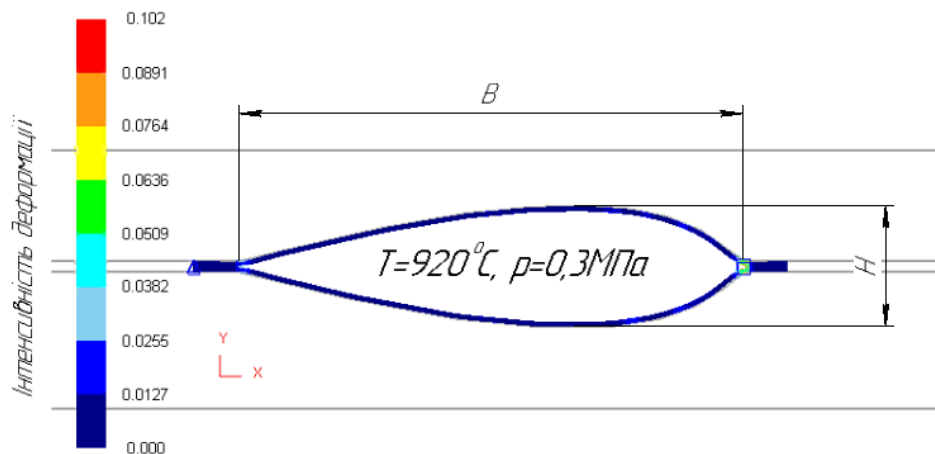
В програмному комплексі DEFORM процес формоутворення розділявся на ряд послідовних стадій в часі - крок. Критерієм розбивки процесу приймалось найменша зміна поля швидкостей деформації всередині стадії. Програмний комплекс DEFORM дає можливість визначити напружено – деформований стан в певний момент формоутворення та в певній точці тіла, що деформується.

## 5.2. Розрахунок формоутворення фрагменту порожнистої лопатки без наповнювача

При формоутворенні фрагменту без наповнювача моделювалися особливості поведінки обшивок при отриманні форми поверхні порожнистої лопатки. На заповнення форми впливають технологічні параметри (температура, тиск) та властивості матеріалу. В якості вихідної заготовки приймалась двошарова заготовка складена з двох листів титанового сплаву, що скріплені в крайових зонах. Між листами заготовки відтворювали тиск газового середовища для навантаження при пластичному формоутворенні.



а)



б)

Рис. 5.3. Формоутворення фрагменту порожнистої лопатки без наповнювача: а), б) – фрагмент порожнистої лопатки після формоутворення

На основі моделювання процесу формоутворення фрагменту порожнистої лопатки з двошарової заготовки показано, що:

1. Процес формоутворення проходить стало. Обшивки порожнистої лопатки в довільному перерізі часу мають плавну знакопостійну форму. При достатній величині тиску та часу деформування приймають форму робочої поверхні матриць;

2. Максимальна величина напружень та деформацій розтягу (потоншення) обшивок виникають в місці максимальної величини висоти поперечного перерізу. Мінімальна величина деформації розтягування (потоншення) відповідає місцю закріплення заготовки (рис. 5.4.). Максимальні деформації обмежують процес деформації;

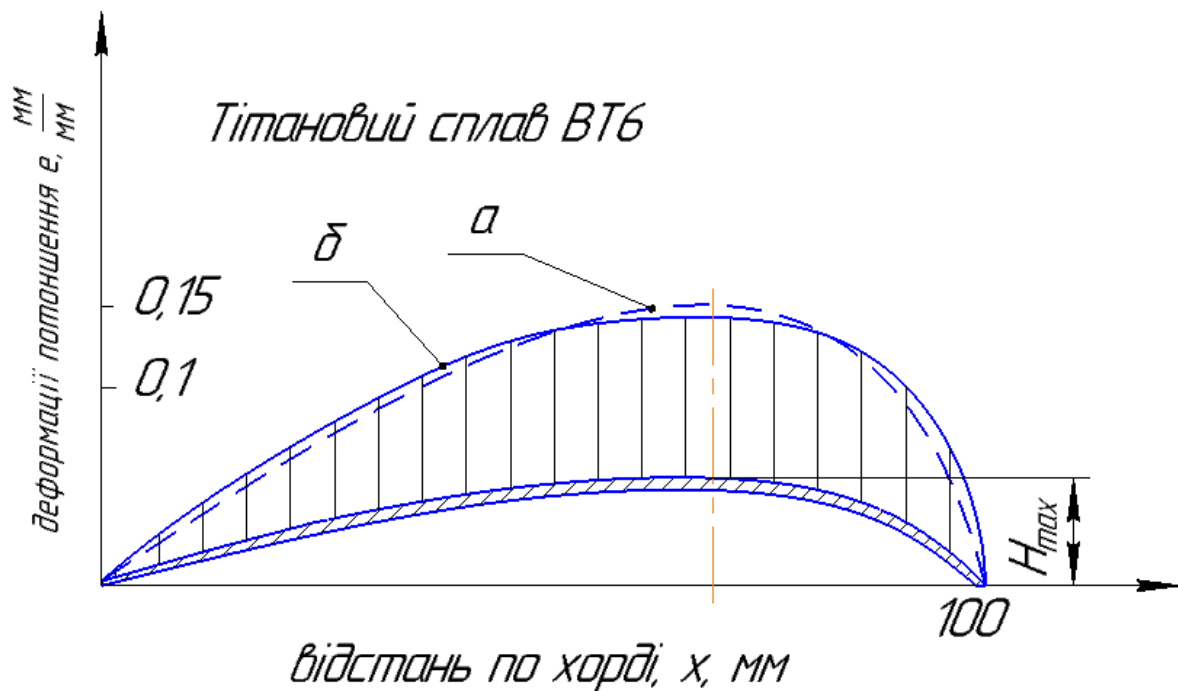


Рис. 5.4. Розподіл деформацій потоншення по контуру поперечного перерізу фрагменту лопатки при внутрішньому тиску 0,3МПа в залежності від температури ізотермічного процесу: а) – 850°C; б) – 940°C

3. Встановлено, що підвищення температури ізотермічного процесу формоутворення з 850°C до 940°C забезпечує більш рівномірний

розподіл деформацій при постійному тиску газового середовища. При цьому зменшується величина максимальних деформацій;

4. Локальні деформації, що виникають в місцях затиснення обшивок на радіусах перегину, можуть мати значну величину. Регулювання цих деформацій може бути здійснено зміною величини радіусу з'єднання. Зі збільшенням величини радіусу величини деформацій зменшуються.

Конструктивно використання великих радіусів робить аеродинамічний профіль лопатки більш плавним (пологим).

### **5.3. Розрахунок формоутворення порожнистої лопатки сумісно з наповнювачем**

#### **5.3.1. Аналіз геометричних параметрів перерізу фрагменту порожнистої лопатки**

Перед формоутворенням заготовка складається з трьох листів - пакет заготовок. В процесі формоутворення зовнішні листи утворюють нижню та верхню обшивки, середній лист, який розташований між двома зовнішніми листами утворює наповнювач. Три листи з'єднанні між собою дифузійним зварюванням (рис. 5.5, а). При формоутворенні заготовка розташована між двома напівматрицями (див. рис. 5.1.). Формоутворення здійснюється газовим середовищем під тиском (рис. 5.5,б).

Основні геометричні характеристики профілю (поперечному перерізу) фрагменту порожнистої лопатки наведені на рис. 5.6.

На рис. 5.7. наведені варіанти, що використані в розрахунку, а в табл. 5.1. – геометричні параметри порожнистої лопатки.

На рис. 5.6. прийняті наступні позначення:

$S_{об}$  - товщина листів, які формують обшивку,  $S_n$  - товщина листа, який формує наповнювач. Прийнято також, що товщина наповнювача постійна та дорівнює  $S_n = 0,3 \text{ мм}$ . Товщини обшивки  $S_{об}$  при моделюванні змінювалася.

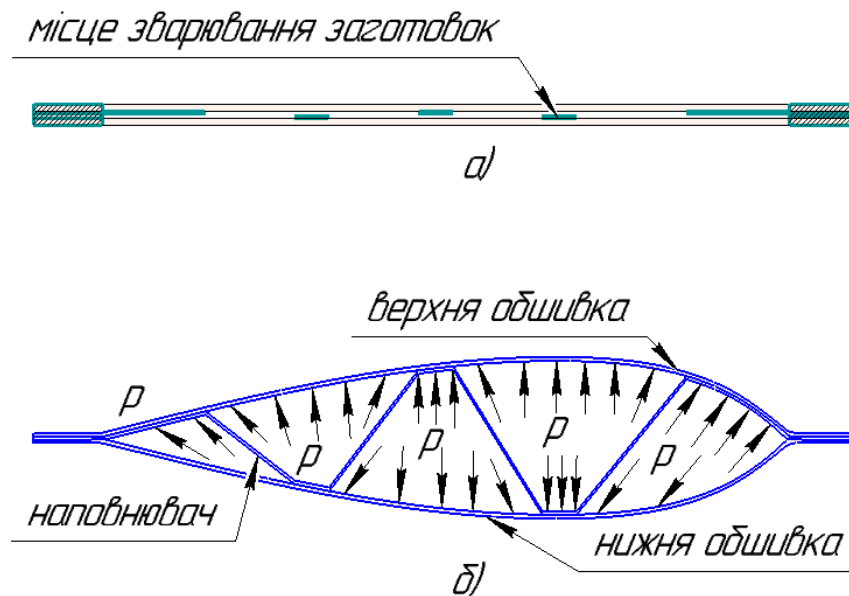


Рис. 5.5. Схема з'єднання пакету заготовок та його формоутворення для розрахунку процесу: а – початковий пакет; б – деформація пакету під дією внутрішнього тиску

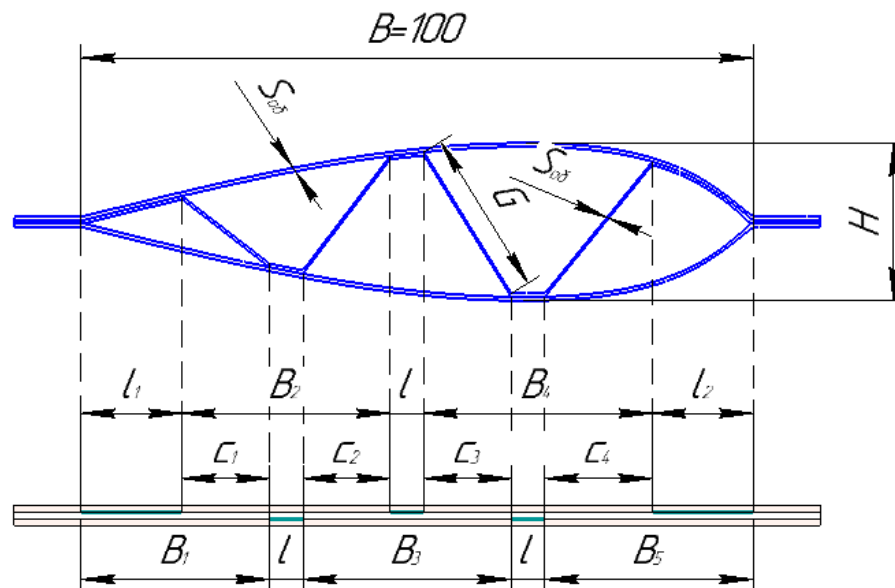


Рис. 5.6. Профіль фрагменту металевої порожнистої лопатки

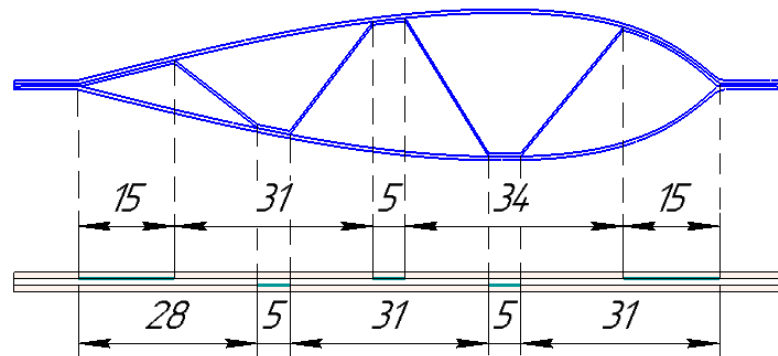
Основні геометричні розміри поперечного перерізу лопатки, що розраховувались в роботі, наведені в табл. 5.1.

Зони вільні від дифузійного з'єднання позначаємо літерою  $B_i$  відповідно до рис. 5.6. Ця величина визначає відстань між елементами з'єднання.

Довжини зони з'єднання наповнювача для всіх варіантів постійна і дорівнювала  $l = 5\text{ мм}$ . Крайові зони з'єднання  $l_1$  та  $l_2$  визначені конструктивно, при цьому вважали що їх величина не впливає на процес формоутворення.

Максимальна висота перерізу фрагменту порожнистої лопатки  $H$ , при моделюванні змінювалась в межах від 6,0 до 22мм у відповідності до табл. 5.1.

Варіант I



Варіант II

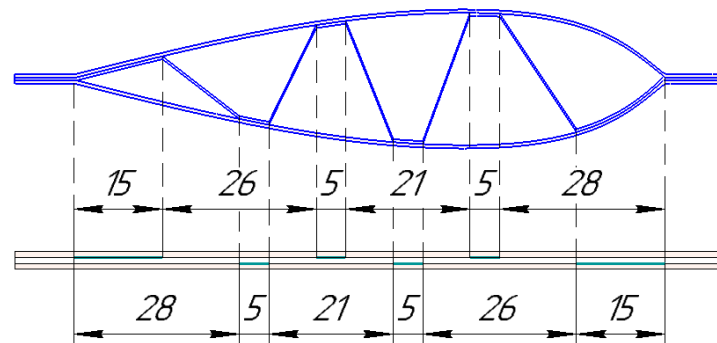


Рис. 5.7. Варіанти з'єднання елементів фрагменту порожнистої лопатки

Геометричні параметри впливають на формоутворення порожнистої лопатки. Максимальні розтягуючі напруження та деформації виникають в зоні перерізу з найбільшою висотою, а саме в нахилених ребрах наповнювача. На деформацію в ребрах наповнювача впливають наступні геометричні параметри  $H, C, B, l$ . Її величини залежать від висоти та кута нахилу ребра наповнювача.

Середню деформацію в цій зоні можна оцінити як  $e = \frac{G - c}{c}$ .

Таблиця 5.1. Геометричні параметри порожнистої лопатки

№	$l_1 = l_2$ , <i>mm</i>	$l$ , <i>mm</i>	$H$ , <i>mm</i>	$B$ , <i>mm</i>	$S_{об}$ , <i>mm</i>	$S_n$ , <i>mm</i>	Варіант
1.	15	5	22	31	1	0.3	I
2.	15	5	22	31	1.5	0.3	
3.	15	5	18	31	1	0.3	
4.	15	5	12	31	1	0.3	
5.	15	5	6	31	1	0.3	
6.	15	5	6	31	1.5	0.3	
7.	15	5	22	21	1	0.3	II
8.	15	5	22	21	1.5	0.3	
9.	15	5	6	21	1	0.3	

Чим більше  $G$  тим більша деформація розтягу. Величина  $G$  залежить від геометричних параметрів та впливає на формоутворення перерізу порожнистої лопатки та на технологічне зусилля. Для аналізу впливу геометрії поперечного перерізу порожнистої лопатки на напружено-деформований стан стінки наповнювача доцільно перейти від абсолютних розмірів до відносних величин. Розглянемо одиничний елемент фрагменту порожнистої лопатки, який представлений на рис. 5.8.

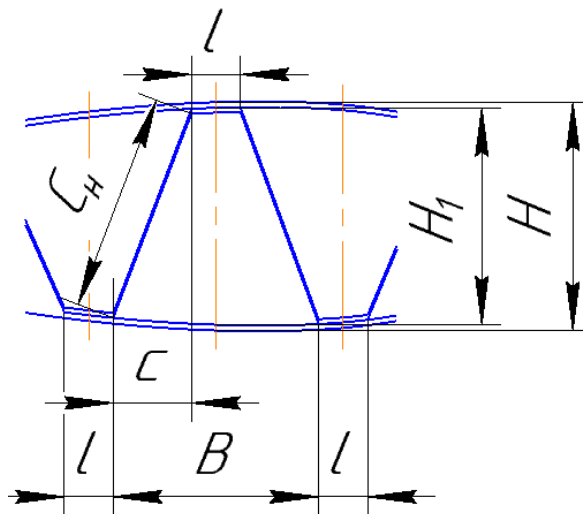


Рис. 5.8. Елемент фрагменту порожнистої лопатки.

Введено позначення  $c = \frac{1}{2}(B-l)$ .

Тоді з геометричних міркувань отримуємо:

$$\begin{aligned} G^2 &= H_1^2 + C^2 \\ G &= \sqrt{H_1^2 + C^2} = \sqrt{C^2 \left( \left( \frac{H_1}{C} \right)^2 + 1 \right)} \\ G &= C \cdot \sqrt{\left( \frac{H_1}{C} \right)^2 + 1} \end{aligned} \quad (5.1.)$$

Залежність (5.1.) дозволяє дати оцінку осередненої деформації стінки наповнювача при формоутворенні:

$$e = \ln \frac{G}{C} = \ln \frac{C \cdot \sqrt{\left( \frac{H_1}{C} \right)^2 + 1}}{C} = \ln \sqrt{\left( \frac{H_1}{C} \right)^2 + 1} \quad (5.2.)$$

Графічно оцінка осередненої деформації стінки (середня величина накопиченої деформації) представлена на рис. 5.9.

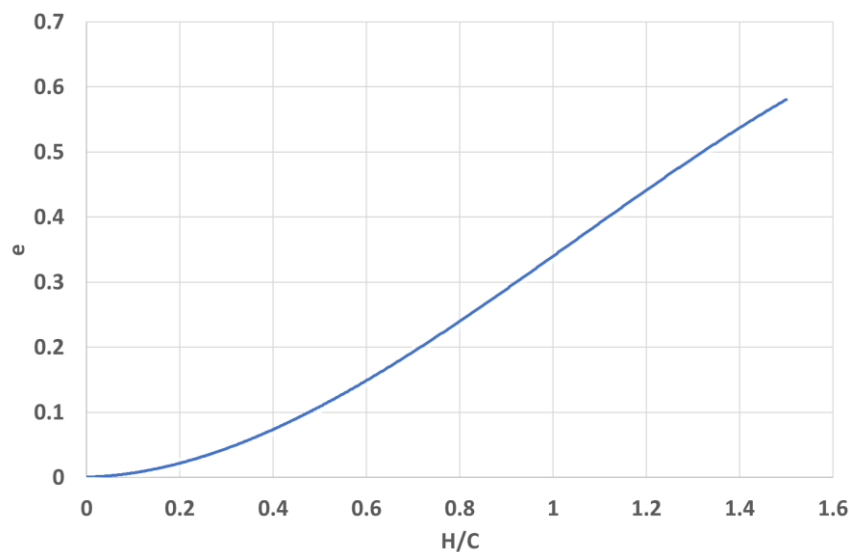


Рис. 5.9. Значення накопиченої деформації в залежності від геометричних параметрів наповнювача

Для визначення граничного значення відносної висоти перерізу використовуємо граничну величину деформації, отриману при формоутворенні мембрани на двовісний розтяг  $e_{\text{гран}} = e_i = e_0$  (розділ 4.2.).



$$\frac{H}{C} = \sqrt{e^{2e_{\text{гран}}} - 1}. \quad (5.3.)$$

де  $e$  - основа натурального логарифма;

$e_{\text{гр}}$  - гранична величина деформації для даних ізотермічних умов.

### 5.3.2. Аналіз результатів розрахунку формоутворення фрагменту порожнистої лопати сумісно з наповнювачем

Аналіз напружено-деформованого стану показав, що деформації по довжині стінки не рівномірні. Максимальні деформації виникають в зоні з'єднання наповнювача з обшивкою в зоні згину наповнювача. В регулярному перерізі стінки наповнювача величина деформацій близька до рівномірної величини, яка дорівнює середній деформації (див. розділ 5.3.2.).

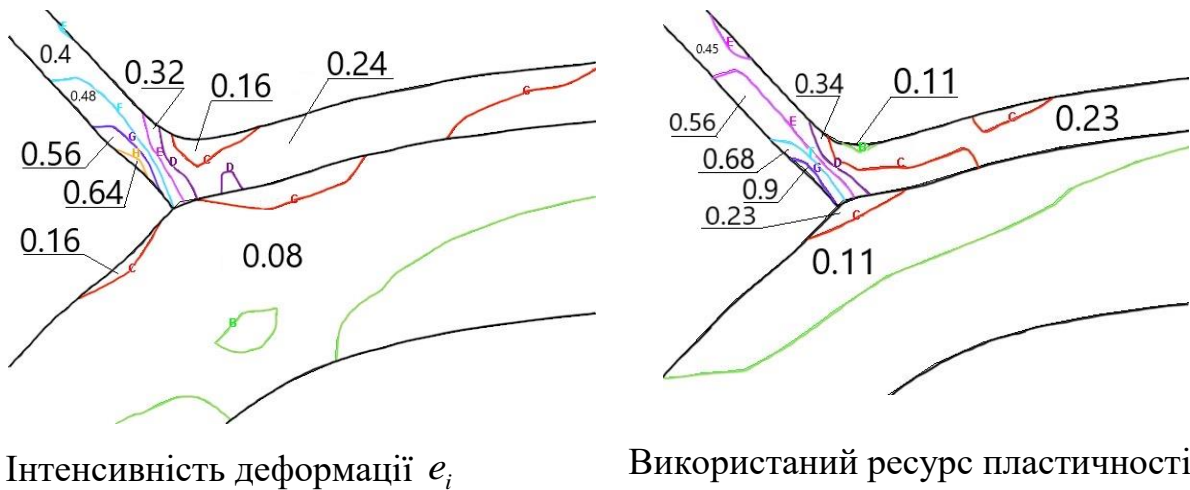


Рис. 5.10. Параметри фрагменту  $\frac{H}{C} = 1,37$ ,  $S_{ob} = 1mm$ ,  $S_n = 0.3mm$

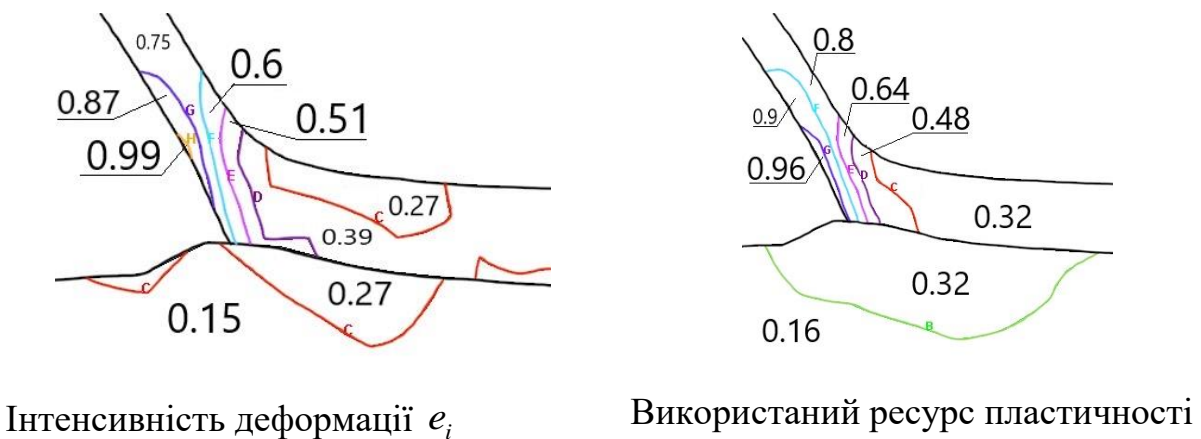
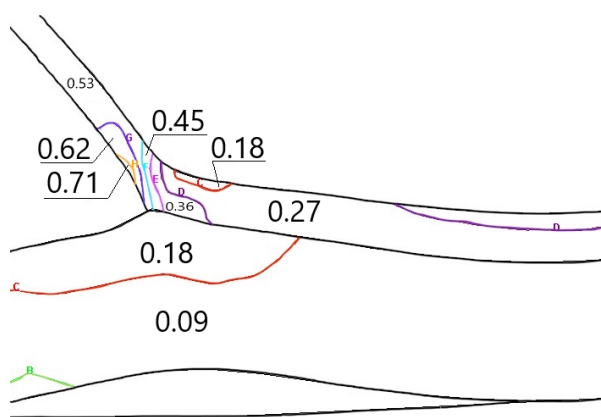
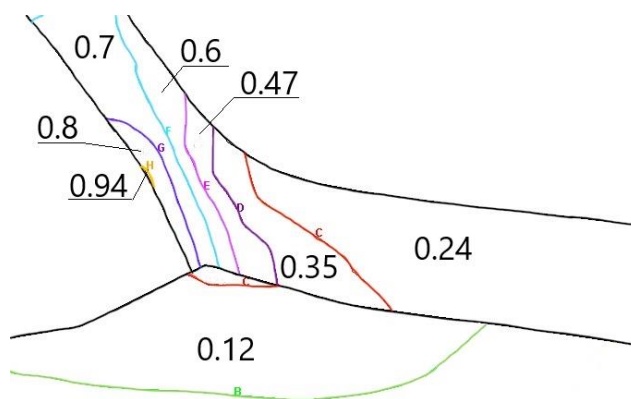
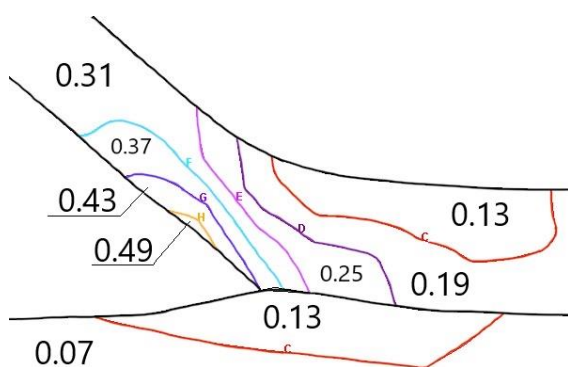
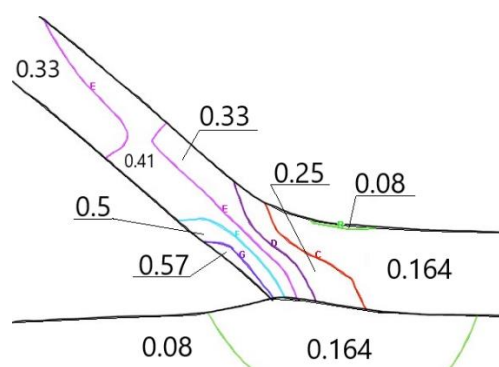


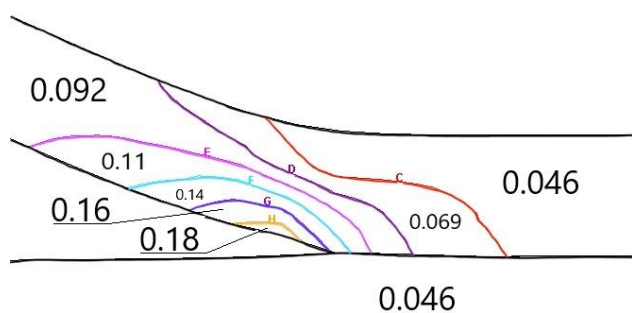
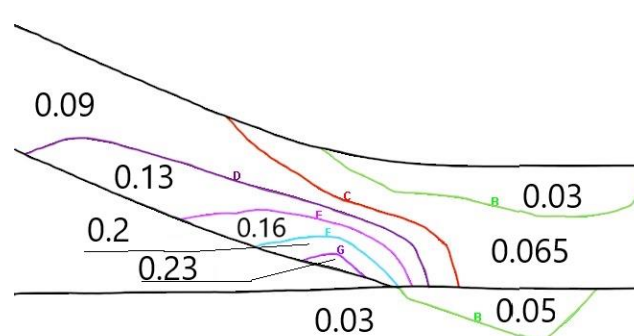
Рис.5.11. Параметри фрагменту  $\frac{H}{C} = 1,37$ ,  $S_{ob} = 1.5mm$ ,  $S_n = 0.3mm$

Інтенсивність деформації  $e_i$ 

Використана пластична деформація

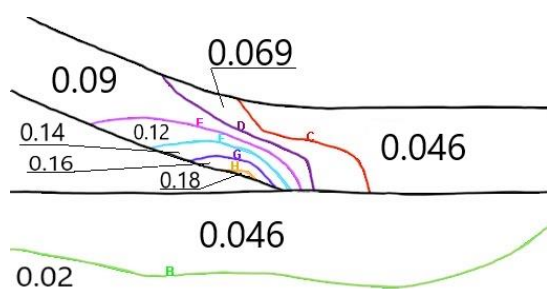
Рис.5.12. Параметри фрагменту  $\frac{H}{C} = 1,12$ ,  $S_{об} = 1mm$ ,  $S_n = 0.3mm$ Інтенсивність деформації  $e_i$ 

Використана пластична деформація

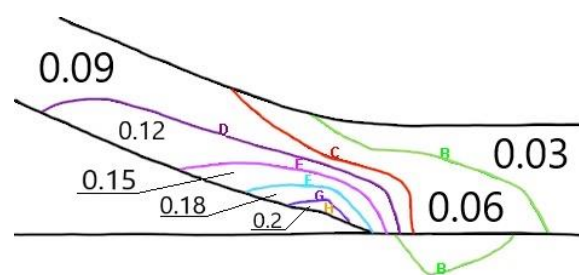
Рис. 5.13. Параметри фрагменту  $\frac{H}{C} = 0,75$ ,  $S_{об} = 1mm$ ,  $S_n = 0.3mm$ Інтенсивність деформації  $e_i$ 

Використана пластична деформація

Рис. 5.14. Параметри фрагменту  $\frac{H}{C} = 0,375$ ,  $S_{об} = 1mm$ ,  $S_n = 0.3mm$

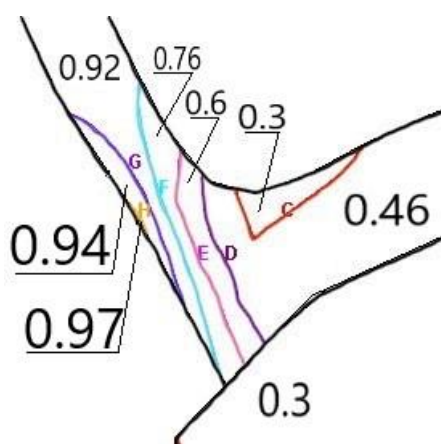


Інтенсивність деформації  $e_i$

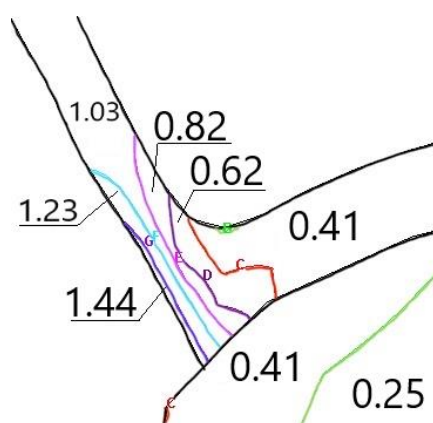


Використана пластична деформація

Рис. 5.15. Параметри фрагменту  $\frac{H}{C} = 0,375$ ,  $S_{об} = 1,5mm$ ,  $S_n = 0,3mm$

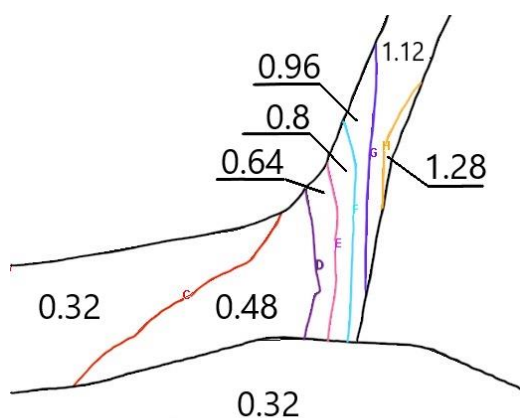


Інтенсивність деформації  $e_i$

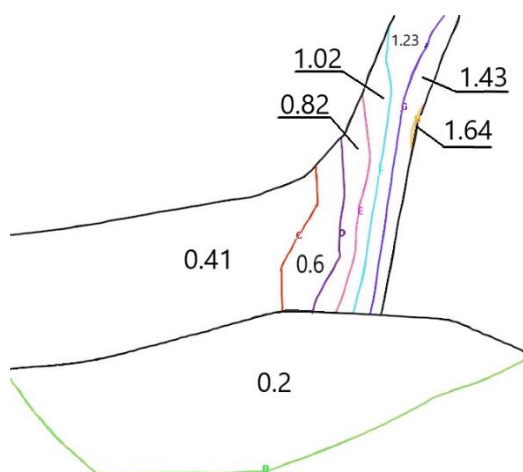


Використана пластична деформація

Рис. 5.16. Параметри фрагменту  $\frac{H}{C} = 2$ ,  $S_{об} = 1mm$ ,  $S_n = 0,3mm$

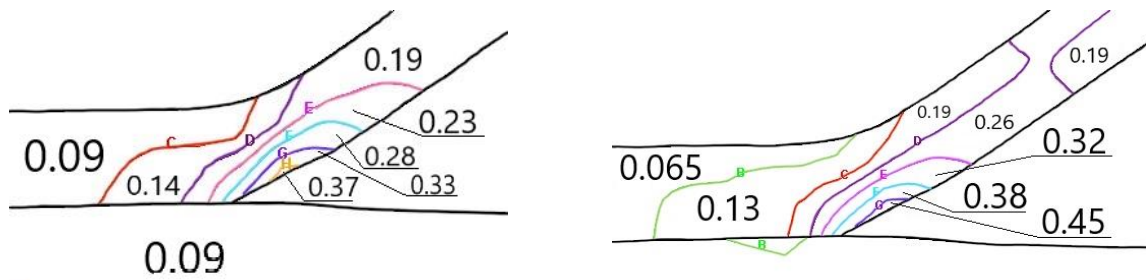


Інтенсивність деформації  $e_i$



Використана пластична деформація

Рис. 5.17. Параметри фрагменту  $\frac{H}{C} = 2$ ,  $S_{об} = 1,5mm$ ,  $S_n = 0,3mm$



Інтенсивність деформації  $e_i$

Використана пластична деформація

Рис. 5.18. Параметри фрагменту  $\frac{H}{C} = 0,57$ ,  $S_{об} = 1mm$ ,  $S_n = 0,3mm$

Аналіз напружено – деформованого стану показав, що небезпечна зона – зона з’єднання наповнювача з обшивкою (рис. 5.10-5.18.). В цій зоні максимальне потоншення. Розтягується елемент наповнювача, який розташований між зонами зварювання з обшивкою.

При зменшенні відстані між зонами з’єднання збільшується накопичена пластична деформація. При  $\frac{H}{C} = 2$  значення накопиченої пластичної деформації досягає 1.44, що свідчить про те що в зоні з’єднання обшивки та наповнювача відбувається руйнування. Найменше значення накопиченої пластичної деформації мають фрагменти порожнистої лопатки товщиною обшивки 1.5мм. При  $\frac{H}{C} = 2$  та товщині обшивки 1.5мм відсутні зони недоформовки. При висоті  $H=22, 18, 12mm$  та товщині обшивки 1мм є зони недоформовки.

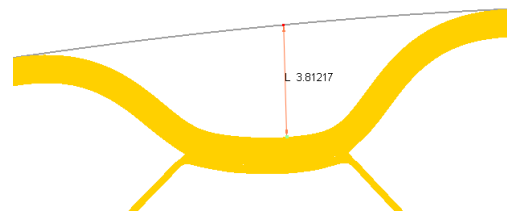
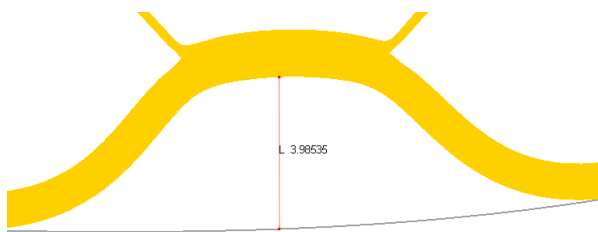
При  $\frac{H}{C} = 0,375$  найменше значення накопиченої пластичної деформації та краще заповнення форми. Збільшення точок контакту наповнювача з обшивкою збільшує значення інтенсивності деформації. Збільшення товщини обшивки до 1.5 мм покращує заповнення форми та усуває зони недоформовки. Збільшення товщини обшивки та кількість точок контакту збільшує час формоутворення.

Для всіх величин  $\frac{H}{C}$ , небезпечна зона знаходиться в місці з’єднання обшивки з наповнювачем.

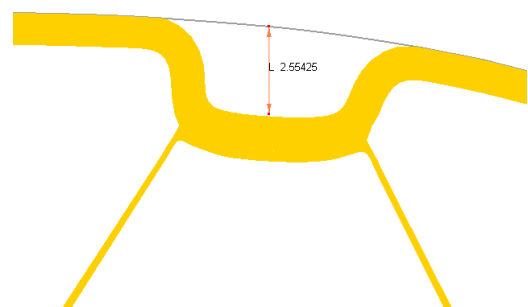
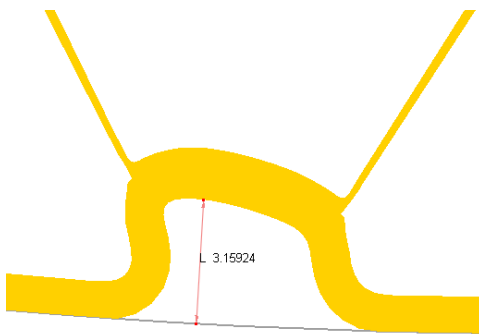
При  $\frac{H}{C} = 0,375$  якісне заповнювання форми. При збільшенні  $\frac{H}{C}$  виникають зони недоформовки. Для ліквідації цих зон необхідно збільшувати товщини обшивки.

Зразок 7 має місця недоформування та накопичена пластична деформація більше одиниці. При збільшенні товщини обшивки до 1.5мм (зразок 8) якість заповнення зовнішньої форми краща, але накопичена пластична деформація більше одиниці в зоні максимального розтягу.

Результати попередніх розрахунків показують, що в процесі формоутворення зразків утворюються зони недоформовки (рис. 5.19). Зонами недоформовки вважаємо зони викривлення наружних обшивок в місці з'єднання їх з наповнювачем. Ці зони виникають під дією зусиль необхідних для деформування розтягуванням наповнювача.



$H=22\text{mm}$ ,  $B=31\text{мм}$ ,  $S_{об}=1\text{mm}$ ,  $S_n=0.3\text{mm}$



$H=22\text{mm}$ ,  $B=21\text{мм}$ ,  $S_{об}=1\text{mm}$ ,  $S_n=0.3\text{mm}$

Рис. 5.19. Зони недоформовки

В процесі формоутворення у зразка №1 утворились чотири зони недоформовки. Зони недоформовки це зони з'єднання наповнювача з обшивкою.

В цих зонах максимальне потоншення стінок наповнювача. Зі збільшенням площі контакту поверхні обшивки з матрицею збільшується час протікання процесу. Максимальні напруження виникають в ребрах наповнювача в зоні найбільшої величини висоти.

Зі збільшенням кількості зон з'єднання зварювання з 3 до 4, зменшилась кількість зон недоформовки та їх розмір  $C$  (рис. 5.19.). При відстані  $B=31\text{мм}$  глибина елемента недоформовки  $3.98\text{мм}$ , при  $B=25\text{мм}$  -  $3.1\text{мм}$ , зона недоформовки зменшилась на 22% (рис. 5.19).

Для зменшення величини (глибини) зон недоформовки необхідно зменшувати зусилля деформування наповнювача. Одним з напрямків зміни зусилля являється керування швидкістю деформацій. Другим напрямком і вибір оптимізованих конструктивних параметрів наповнювача та його місця з'єднання з обшивкою.

Моделювання показало, що для зон недоформовки необхідно зменшити  $\frac{H}{C}$ . При висоті  $H=22\text{мм}$ ,  $18\text{мм}$  є зони недоформовки.

Таблиця.5.2. Результати моделювання

№	$H, \text{мм}$	$B, \text{мм}$	$S_{об}, \text{мм}$	$S_n, \text{мм}$	$\varepsilon_i$	Використана пластична деформація
1.	22	31	1	0.3	0.64	0.9
2.	22	31	1.5	0.3	0.99	0.96
3.	18	31	1	0.3	0.71	0.94
4.	12	31	1	0.3	0.49	0.57
5.	6	31	1	0.3	0.18	0.23
6.	6	31	1.5	0.3	0.18	0.2
7.	22	21	1	0.3	0.97	1.44
8.	22	21	1.5	0.3	1.28	1.64
9.	6	21	1	0.3	0.37	0.45

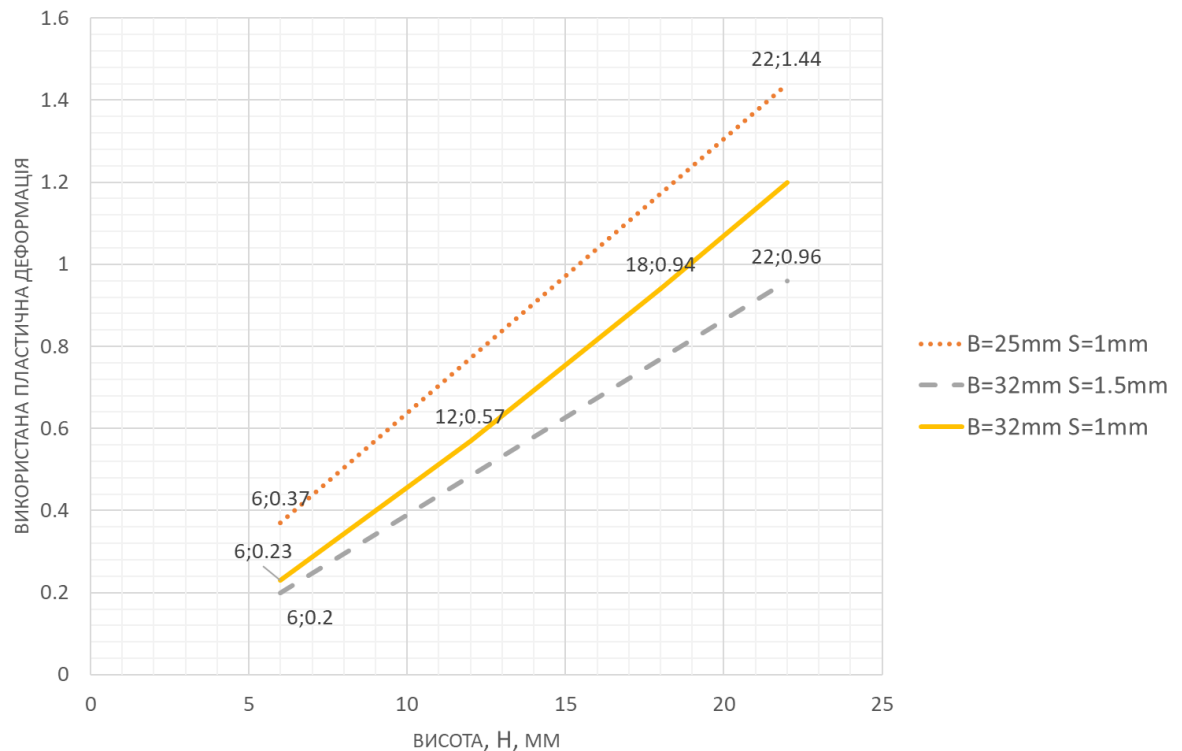


Рис. 5.20. Залежність використаної пластичної деформації від геометричних параметрів фрагменту порожнистої лопатки

Збільшення точок з'єднання обшивки з наповнювачем, тобто зменшення величини  $B$ , збільшує значення накопиченої пластичної деформації. При  $B=32\text{мм}$  збільшення товщини обшивки до  $1.5\text{мм}$  зменшує значення накопиченої пластичної деформації та покращує заповнення форми листового наповнювача при висоті  $H=12\ldots 22\text{мм}$ , при  $B=25\text{мм}$  та  $S_{об}=1.5$  значення накопиченої пластичної деформації зростає.

Розрахунки показали, що функція розподілу максимальної величини локальної накопиченої пластичної деформації пропорційна відносній висоті стінки елементу наповнювача (рис. 5.21). В той же час в інтервалі значень відносної висоти стінки при формоутворенні від  $1,2\ldots 1,37$  спостерігається розрив функції накопиченої деформації.



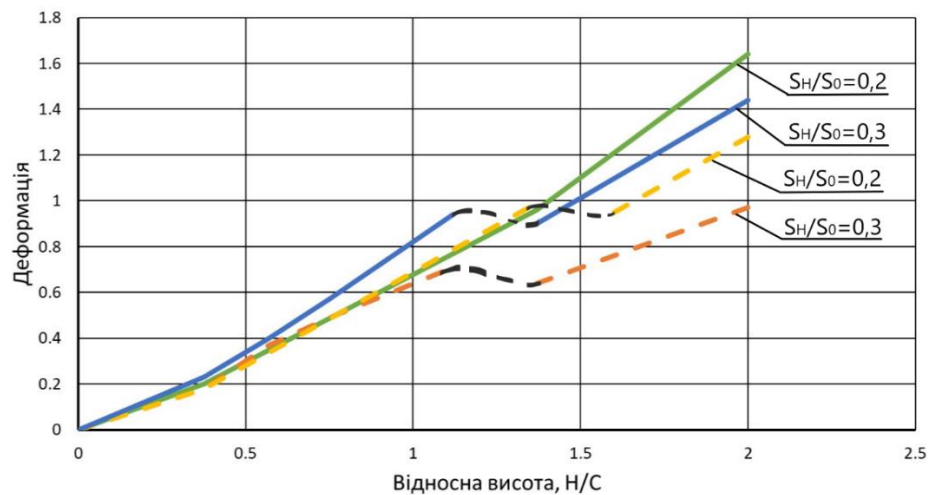


Рис. 5.21. Функція залежності максимальної величини локальної накопиченої пластичної деформації від відносної висоти поперечного перерізу порожнистої лопатки та відносної висоти стінки наповнювача

Аналіз показує, що це пов'язано з викривленням обшивок та виникненням зон недоформовки (рис. 5.22.) які зменшують відносну висоту стінки наповнювача при загальному збільшенні висоти поперечного перерізу порожнистої лопатки.

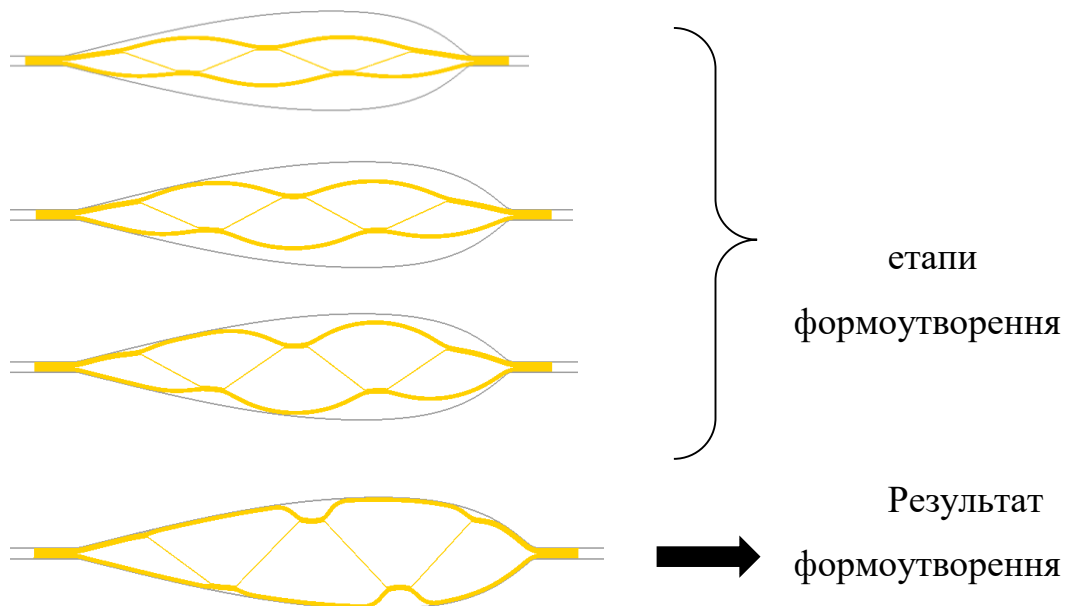


Рис. 5.22. Кінематична схема деформування фрагменту порожнистої лопатки (поперечного перерізу:  $H/C = 1,37$ ,  $S_H/S_{об} = 0,3$ ) з формоутворенням недоформовки



Таким чином утворення недоформовки починається після відносної  $\frac{H}{C} > 1,2$ . Такий результат співпадає з результатом залежності висоти недоформовки ( $\Delta$ ) від  $\frac{H}{C}$  (рис. 5.22.). Після величини  $\Delta \geq 0,10 \dots 0,15 \text{ мм}$ , що відповідає  $\frac{H}{C} \approx 1,20 \dots 1$  починається інтенсивний ріст висоти недоформовки для кінцевої форми.

Для зменшення висоти недоформовки необхідно зменшувати напруження формоутворення стінки наповнювача. Це може бути досягнуто наступними напрямками:

1) керування швидкістю деформацій за рахунок величини тиску: зі зменшенням швидкості деформацій – зменшується зусилля розтягування стінки наповнювача;

2) зменшення відносної товщини стінки наповнювача;

В інтервалі великих значень відносної висоти перерізу порожнистої лопатки ( $\frac{H}{C} \geq 1,2 \dots 1,5$ ) використання цих напрямів не дає ефективного результату (рис. 5.23). Було запропоновано нове конструкторсько – технологічне рішення, що захищено патентом.

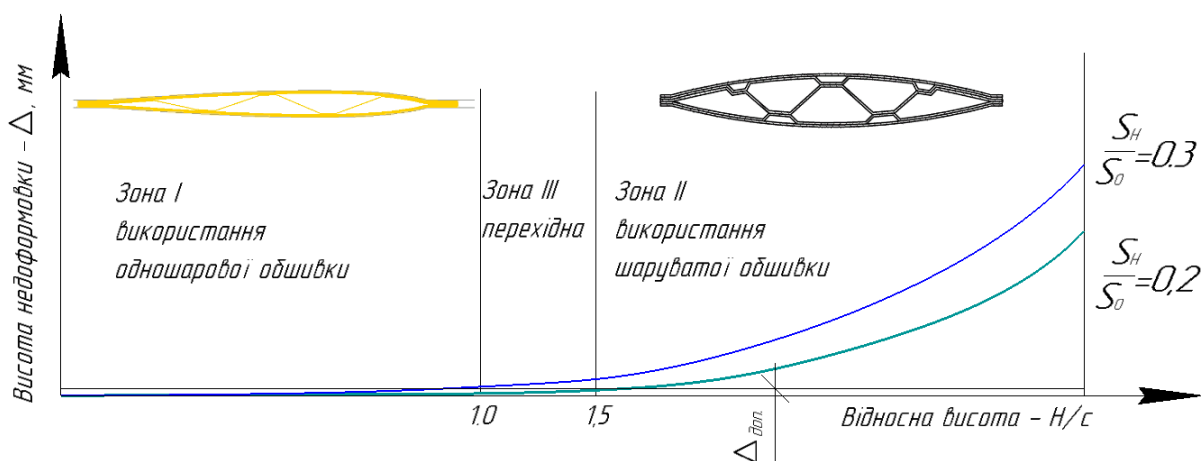


Рис. 5.23. Залежність КТР від геометричних параметрів порожнистої лопатки

Для удосконалення способу виготовлення виробів з подвійною обшивкою дифузійним зварюванням та формуванням за рахунок використання додаткових листів обшивки, що забезпечить бездефектну аеродинамічну поверхню та жорсткість внутрішньої конструкції виробів, запропоновано та запатентоване технічне рішення (рис. 5.24). Технічне рішення забезпечить бездефектну аеродинамічну поверхню та жорсткість внутрішньої конструкції виробів.

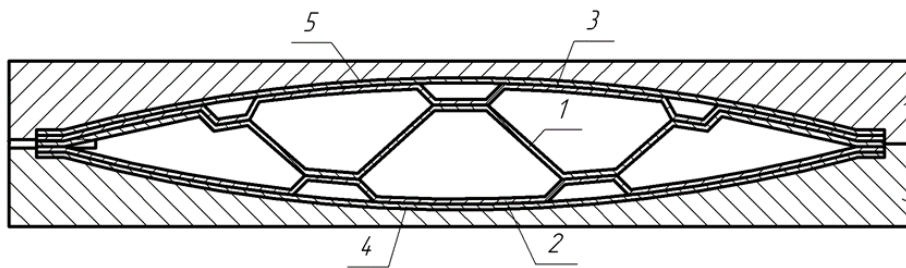


Рис. 5.24. Пакет із п'яти листів на стадії формування: 1 – лист наповнювача, 2, 3 – внутрішня обшивка, 4,5 – зовнішня обшивка.

Виріб складається щонайменше з п'яти листів, в якому на одну із заготовок на вибраних ділянках наносять матеріал, для унеможливлення дифузійному зварюванню, розміщують між двох листів, які утворюють внутрішню обшивку, вкладають в оснащення, нагрівають до необхідної температури і прикладають тиск зовні пакета для з'єднання заготовок дифузійним зварюванням, розміщують між листами зовнішньої обшивки, нагрівають до температури надпластичності і подають робоче середовище під тиском між листами внутрішньої обшивки і внутрішнім листом.

Внутрішню обшивку не з'єднують з зовнішньою обшивкою, а ребра жорсткості формують з внутрішнього листа і внутрішніх обшивок. Зовнішні листи обшивки деформують зусиллям газу під тиском, яке передається через листи внутрішніх обшивок. Пакет складають з листа 1, на певні ділянки якого нанесено матеріал, який запобігає дифузійному зварюванню, і листів внутрішньої обшивки 2 і 3. Пакет нагрівають до температури дифузійного

зварювання і зовні пакета прикладають необхідний тиск. До пакету додають листи зовнішньої обшивки 4 і 5, розміщують в матриці, нагрівають до температури надпластичного формування і подають стиснений газ в середину пакета між листами 1, 2 і 3.

#### **5.4. Висновки до розділу 5**

1. Виконаний розрахунок формоутворення порожнистої лопатки чисельними методами в програмному комплексі DEFORM. Точність результатів розрахунку залежить від граничних та початкових умов, які задаються користувачем. Без урахування реальних властивостей матеріалу неможливо отримати досить точну картину течію матеріалу. Була використана модель матеріалу, які отримали експериментально.

2. Проведений аналіз геометричних параметрів перерізу фрагменту порожнистої лопатки. Геометричні параметри впливають на формоутворення порожнистої лопатки. Для оцінки впливу геометричних параметрів введений показник  $\frac{H}{C}$ .

3. В процесі формоутворення фрагменту порожнистої лопатки виникають зони недоформовки в місці з'єднання наповнювача та обшивки. Для ліквідації цих зон запропоновано збільшення товщини обшивки та використання додаткових листів обшивки.

## 6. Експериментальні дослідження

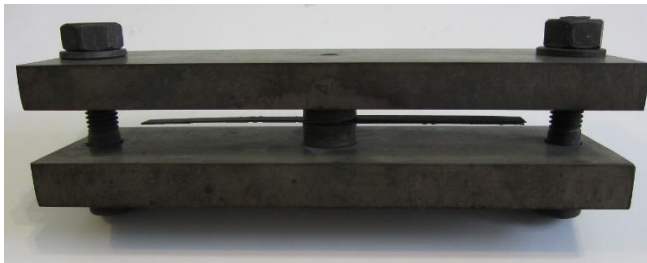
### 6.1. Експериментальне визначення режимів процесу виконання з'єднань методом зварюванням тиском на типових елементах (зразках)

#### 6.1.1. Проведення експерименту

Перед зварюванням зразків з поверхні заготовок механічно зачищували. Пакет з трьох заготовок встановлювали між нажимними вставками. Силу прижиму титанового пакета регулюємо затягуванням болтів.



Рис. 6.1. Заготовки для зварювання тиском



а)



б)

Рис. 6.2. Пристрій для зварювання тиском: а – у складеному стані з пакет заготовок; б – в розібраному стані

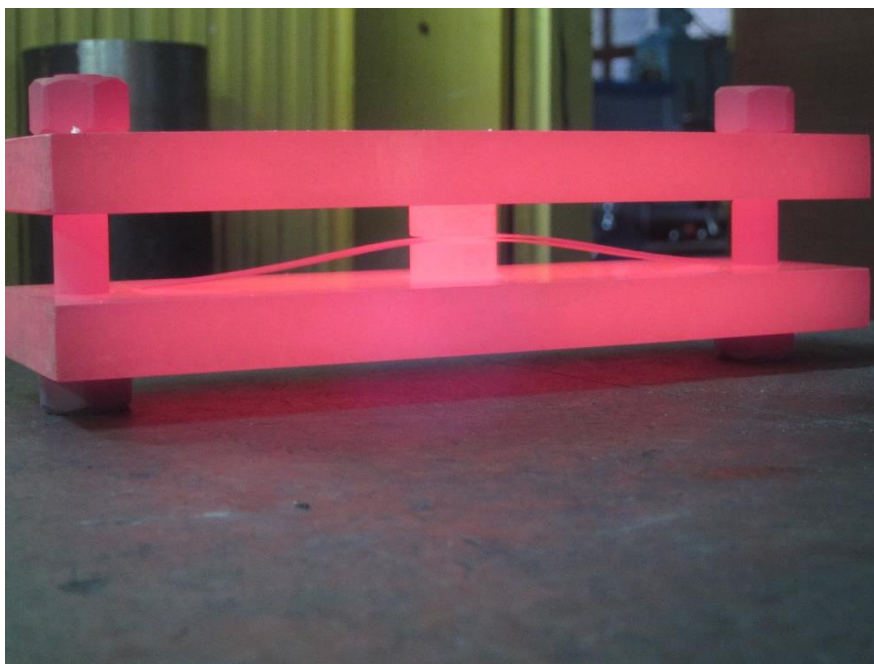


Рис. 6.3. Пристрій з пакетом заготовок при зварюванні в печі

#### **6.1.2. Умови експерименту**

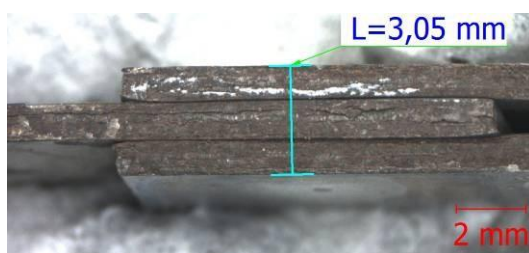
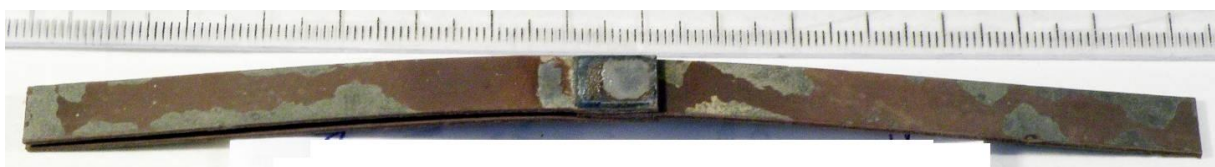
В ході експерименту досліджували такі параметри: температура, навколишнє середовище, способи охолодження. Температуру міняли в діапазоні для сплаву ОТ4-0  $820^{\circ}$ - $850^{\circ}$ , для сплаву ВТ6  $900^{\circ}$ - $920^{\circ}$ . Час витримки під тиском для всіх зразків було однаковим - 40 хв. Після закінчення часу, пристосування витягували з печі і охолоджували на повітрі. Для сплаву ОТ4-0 при температурі змінювали середу зварювання під тиском: з аргоном і без аргону.

#### **6.1.3. Результати експерименту**

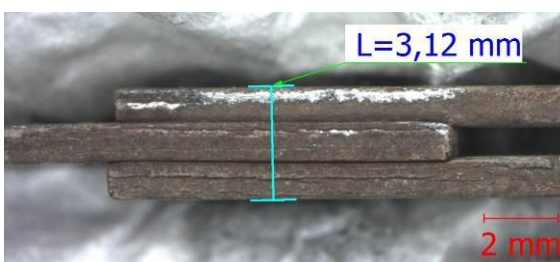
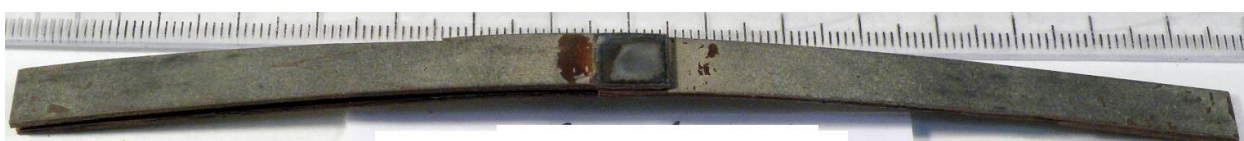
Товщина з'єднання пластин була заміряна на темплетях для металографії завдяки бінокулярного мікроскопа при збільшенні  $6,5^{\times}$  (табл. 6.1, рис. 6.4).

Таблиця 6.1. Дослідження зразків, зварених під тиском, зі сплавів ВТ6 і ОТ4-0

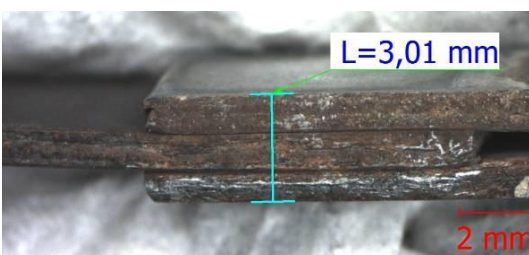
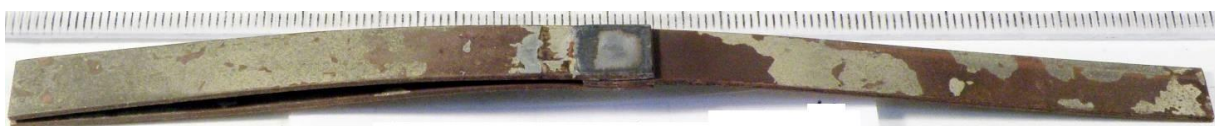
Матеріал	№	Тиск при зварюванні	Товщина матеріалу S, мм	Середовище	Режими нагріву	Загальна товщина пакета в зоні з'єднання, мм	Товщина пакета після зварювання, мм	Потоншення	Механічні випробування			Макроструктура	Розмір зерна після зварювання, мкм
									Навантаження Р, кгс	$\sigma_B$ , МПа	Місце руйнування зразка		
ВТ6	1	32,5МПа	1,1	аргон	T=900°C, τ=40хв.	3,3	3,05	0,07	839	823,1	По основному матеріалу	без прояву макрозерна, є лінійні зазори	4,6
	2	32,5МПа	1,1	аргон	T=900°C, τ=40хв.	3,3	3,12	0,05	804	788,4	По основному матеріалу	без прояву макрозерна, є лінійні зазори	6,8
	3	32,5МПа	1,1	аргон	T=920°C, τ=40хв.	3,3	3,01	0,09	851	834,6	По основному матеріалу	без прояву макрозерна, є лінійні зазори	5,6
	8	32,5МПа	1	аргон	T=920°C, τ=40хв.	3	3	0	864	834,6	По основному матеріалу	без прояву макрозерна, є лінійні зазори	6
ОТ4	4	41,6МПа	0,5	аргон	T=820°C, τ=40хв.	1,5	1,4	0,06	261	255,8	По основному матеріалу	без прояву макрозерна	10,8
	5	41,6МПа	0,5	аргон	T=830°C, τ=40хв.	1,5	1,08	0,32	255	249,8	Біля зварювальної зони	без прояву макрозерна	9,2
	6	41,6МПа	0,5	аргон	T=840°C, τ=40хв.	1,5	1,4	0,06	256	251,2	По основному матеріалу	без прояву макрозерна	10,6
	7	41,6МПа	0,5	аргон	T=850°C, τ=40хв.	1,5	1,33	0,12	277	272	По основному матеріалу	без прояву макрозерна	10,2
	9	41,6МПа	0,5	без аргону	T=850°C, τ=40хв.	1,5	1,5	0	298	298	По основному матеріалу	без прояву макрозерна, є лінійні зазори	11



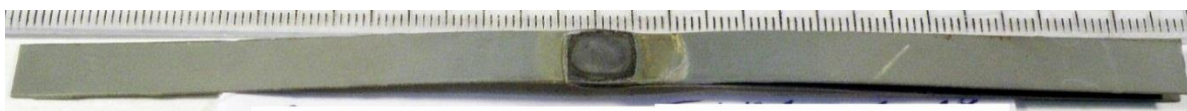
a)



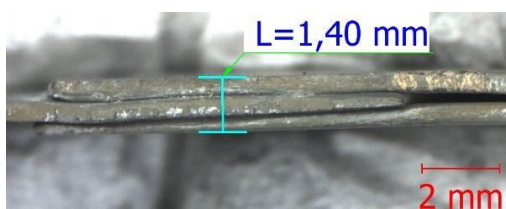
б)



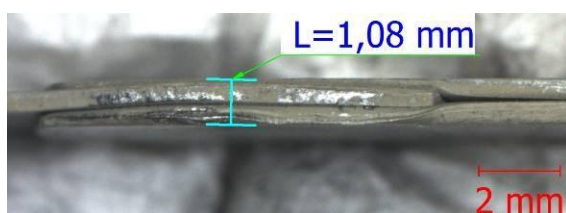
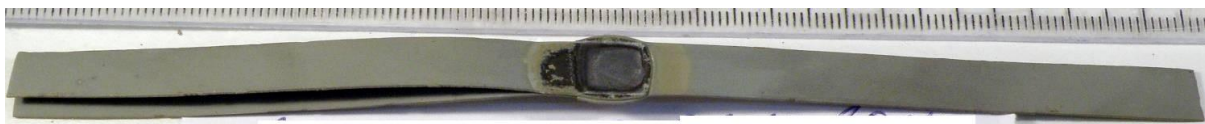
B)



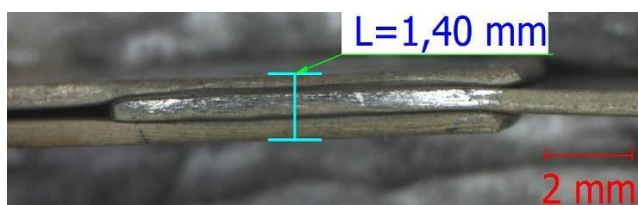
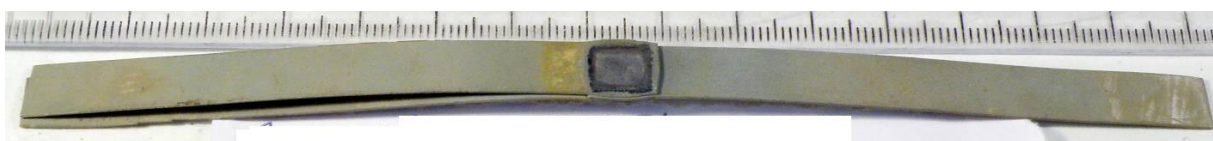




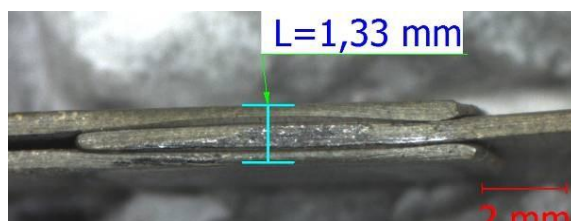
г)



д)

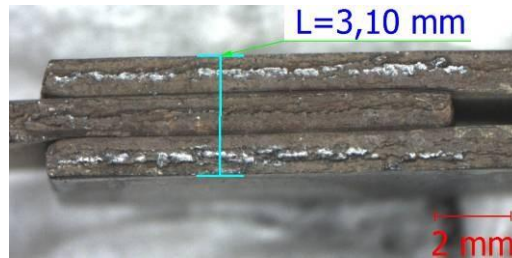


е)

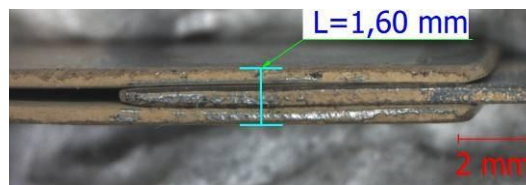
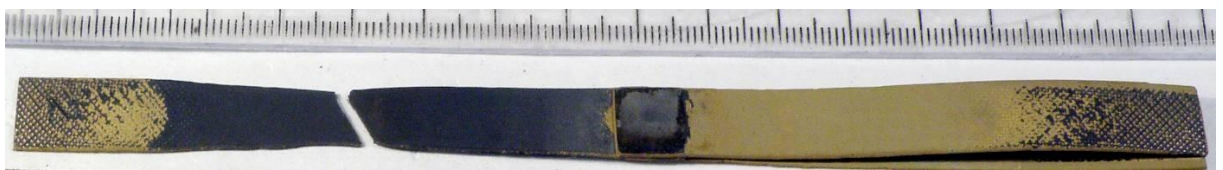


ж)





з)



к)

Рис. 6.4. Зразки після зварювання: а - зразок №1; б - зразок №2; в - зразок №3; г - зразок №4; д - зразок №5; е - зразок №6; ж - зразок №7; з - зразок №8; к - зразок №9

Основними вимогами до з'єднань отриманих зварюванням під тиском це міцність, відсутність тріщин та непроварів. Для визначення якості з'єднання отриманого при зварюванні тиском необхідно провести комплекс досліджень, при якому окремі методи доповнюють один одного. Комплексне дослідження включає неруйнуючий контроль якості з'єднання та металографічні дослідження для виявлення дефектів в зоні з'єднання, механічні дослідження (випробування на розтяг) для оптимізації режимів зварювання під тиском. Для оцінки якості з'єднання результати випробувань порівнюють з аналогічними характеристиками основного матеріалу.

### 6.1.4. Механічні випробування

Результати випробувань на розрив (руйнівне навантаження, Р), які були проведені на машині «INSTRON- 8862» (Німеччина), досліджуваних зразків представлені в таблиці 6.2, (рис. 6.4).

Таблиця 6.2. Результати випробувань на розрив

№	Сплав	Загальна товщина пакета в зоні з'єднання, мм	Навантаження Р, кгс	Місце руйнування зразка
1	ВТ6	3,05	839	По основному матеріалу
2	ВТ6	3,12	804	По основному матеріалу
3	ВТ6	3,01	851	По основному матеріалу
8	ВТ6	3,10	864	По основному матеріалу
9	ОТ4-0	1,60	298	По основному матеріалу
4	ОТ4-0	1,40	261	По основному матеріалу
5	ОТ4-0	1,08	255	Біля зварювальної зони
6	ОТ4-0	1,40	256	По основному матеріалу
7	ОТ4-0	1,33	277	По основному матеріалу

Як видно з даних таблиці 6.2, для зразків зі сплаву ОТ4-0 зі збільшенням товщини місця з'єднання фіксується підвищення руйнівного навантаження, для зразків зі сплаву ВТ6 такої залежності не спостерігається (рис. 6.5 – 6.11).

Таблиця 6.3. Механічні характеристики зразків

№	Навантаження, кН	Навантаження, кгс	Границя текучості умовна $\sigma_{0,2}$ , МПа	Границя текучості умовна $\sigma_{0,2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Тимчасовий опір, МПа	Тимчасовий опір, кгс/мм <sup>2</sup>	Подовження (%)
1	8,23	839,32	753,6	76,85	823,1	83,93	2,86
2	7,88	803,94	730,5	74,49	788,4	80,39	2,19
3	8,35	851,06	752,0	76,68	834,6	85,11	2,88
4	2,56	260,87	193,9	19,77	255,8	26,09	7,09
5	2,50	254,68	191,1	19,48	249,8	25,47	4,57
6	2,51	256,17	193,5	19,74	251,2	25,62	7,99
7	2,72	277,35	271,0	27,63	272,0	27,74	2,55

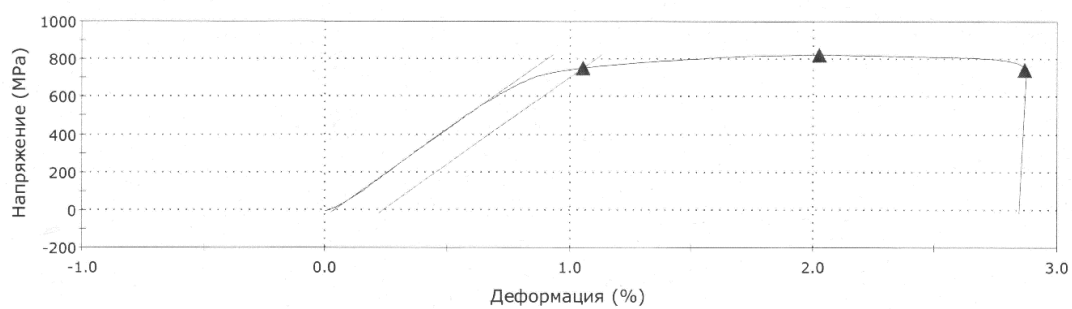


Рис. 6.5. Графік розтягу 1 зразка

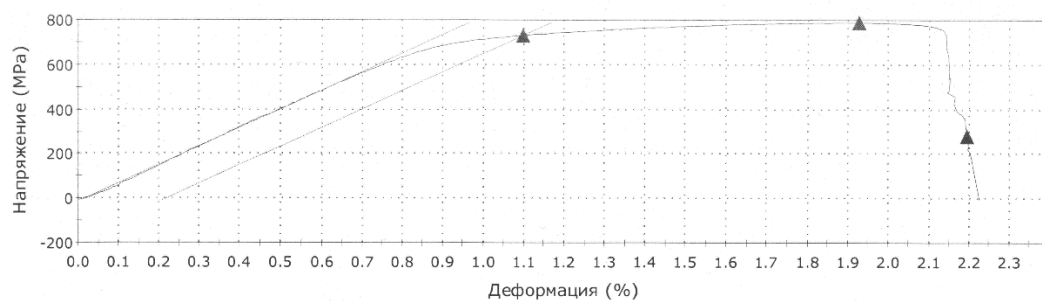


Рис. 6.6. Графік розтягу 2 зразка

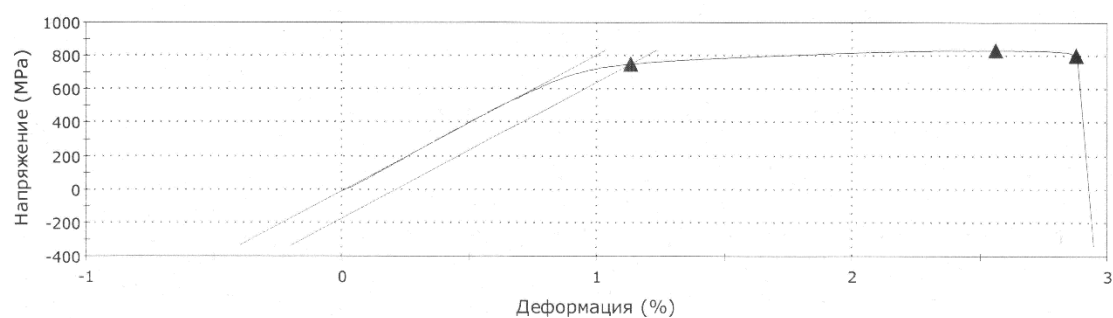


Рис. 6.7. Графік розтягу 3 зразка

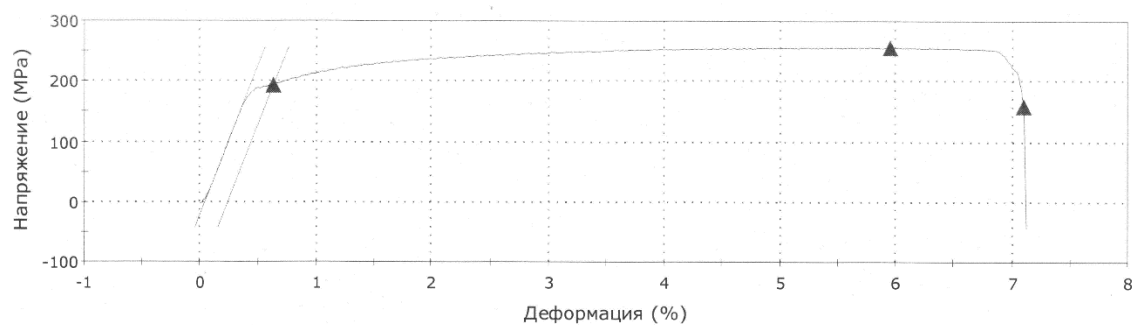


Рис. 6.8. Графік розтягу 4 зразка

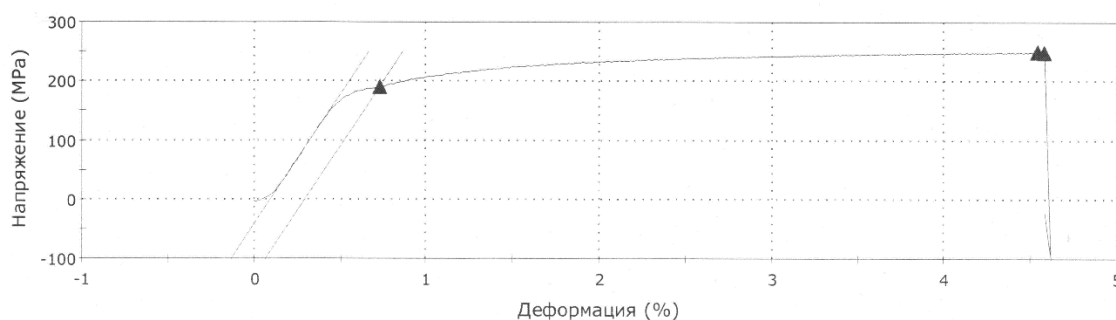


Рис. 6.9. Графік розтягу 5 зразка

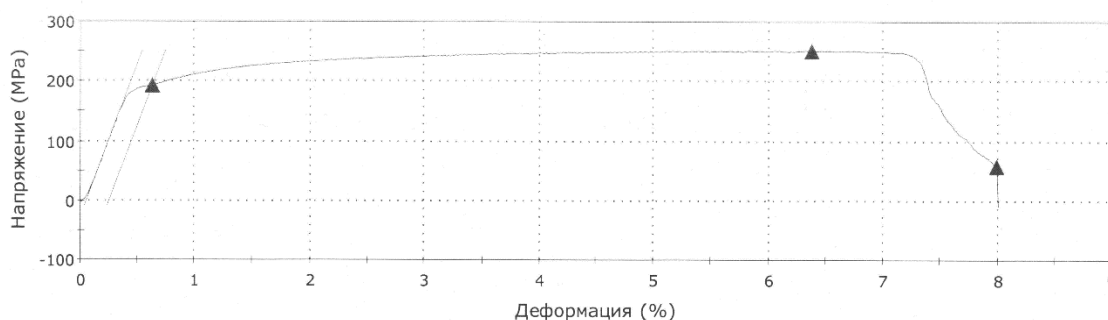


Рис. 6.10. Графік розтягу 6 зразка

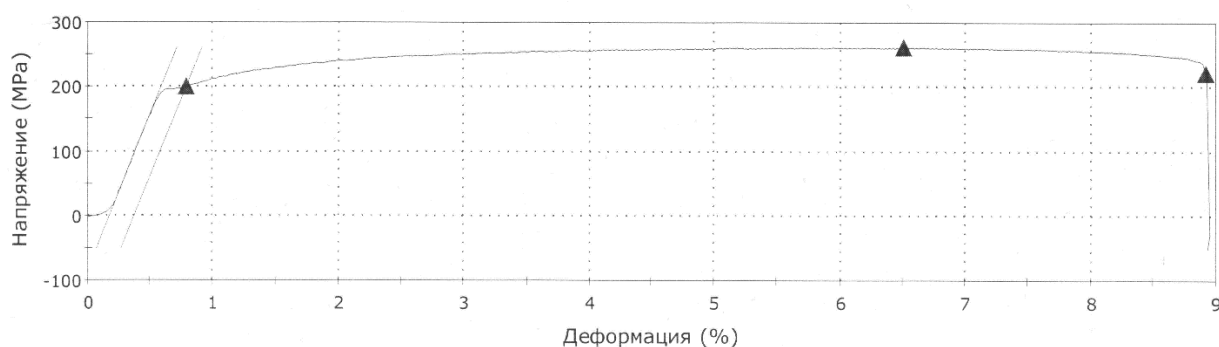


Рис. 6.11. Графік розтягу 7 зразка

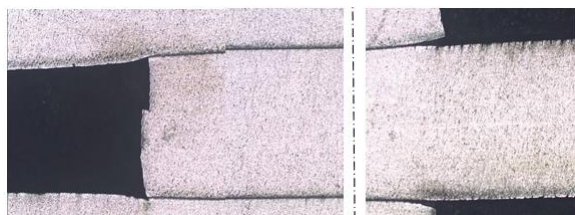
### 6.1.5. Дослідження макроструктури

Макроструктура оцінювалася на шліфах, виготовлених в дольовому напрямку зразків за місцем з'єднання пластин.

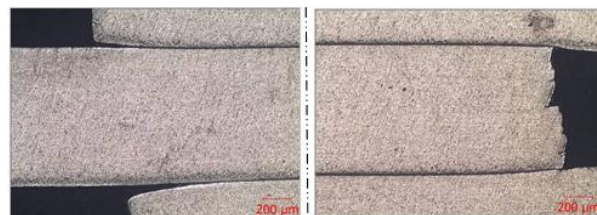
Візуальний огляд шліфів показав, що фон макроструктури зразків матовий, без прояву макрозерна, що відповідає 1-му балу 10-бальної шкали макроструктур Інструкції ВІАМ №1054 (рис. 6.12-6.13).

Слід зазначити, що в макроструктурі зразків зі сплаву ВТ6 (№1-3, 8) і в зразку №9 зі сплаву ОТ4-0 в місці з'єднання пластин є лінійні зазори, в інших

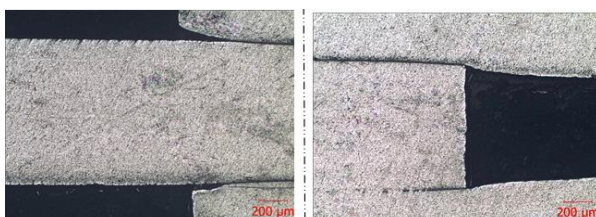
зразках зі сплаву ОТ4-0 (№4-7) в середній частині місця з'єднання зазори між пластинами практично не проглядаються.



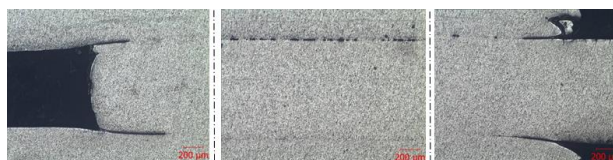
зразок №1



зразок №2



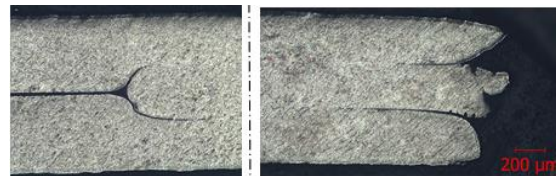
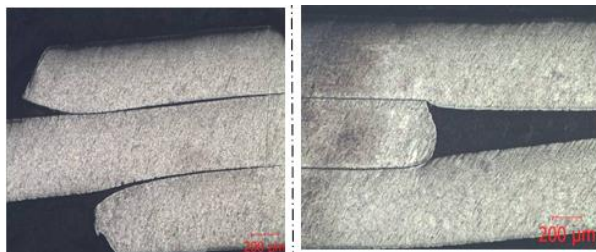
зразок №3



зразок №8

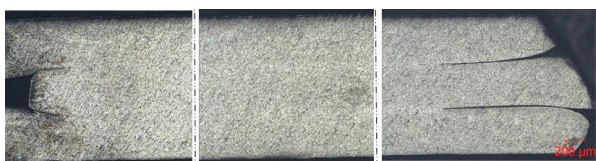
Рис. 6.12. Макроструктура зразків зі сплаву ВТ-6, зб. 6,5<sup>x</sup>





зразок №4

зразок №5



зразок №6

зразок №7



зразок №9

Рис. 6.13. Макроструктура зразків зі сплаву ОТ4-0, зб. 6,5<sup>x</sup>

### 6.1.6. Дослідження мікроструктури

Мікроструктура металу пластин в зоні їх з'єднання і у віддаленій від з'єднання частини ідентична і характерна для нормально термообробленого стану сплавів ВТ6 і ОТ4-0, перегріву немає (рис. 6.46-6.54, а). Мікроструктура зразків зі сплаву ВТ6 є  $\alpha+\beta$ -фази глобулярної форми, зразків зі сплаву ОТ4-0 -  $\alpha$ -фазу з невеликою кількістю ( $<5\%$ )  $\beta$ -фази, що характерно для псевдо- $\alpha$ -сплавів.

Величину мікрозерна визначали фактично - вимірами на поле шліфа із застосуванням програмного забезпечення мікроскопа «Observer.D1m» (фірма «Carl Zeiss») і розрахунком їх середнього значення (рис. 6.14-6.22, б).

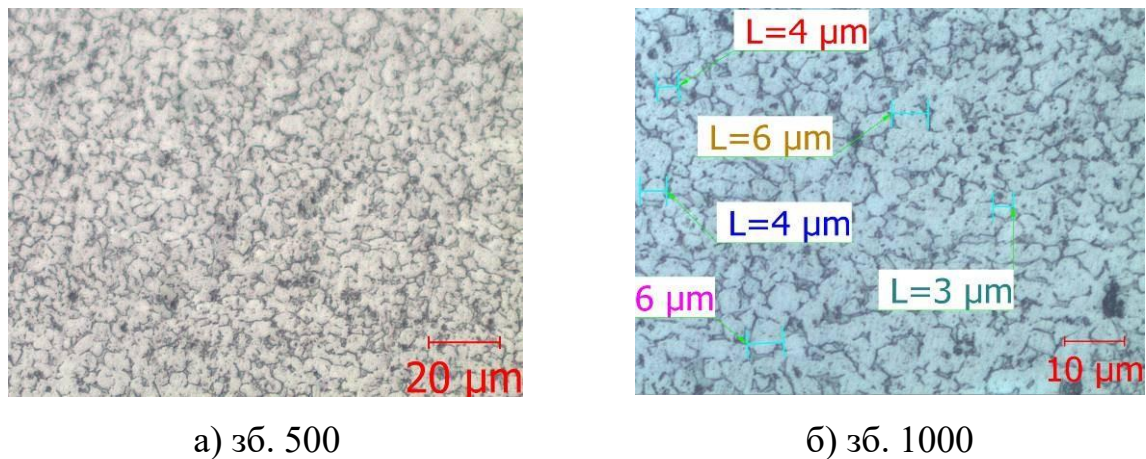


Рис. 6.14. Мікроструктура зразка №1 зі сплаву ВТ6

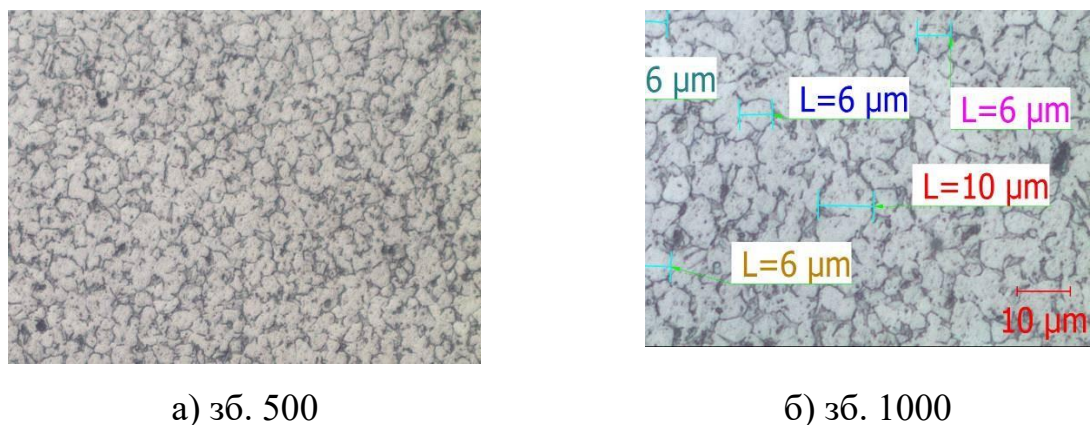
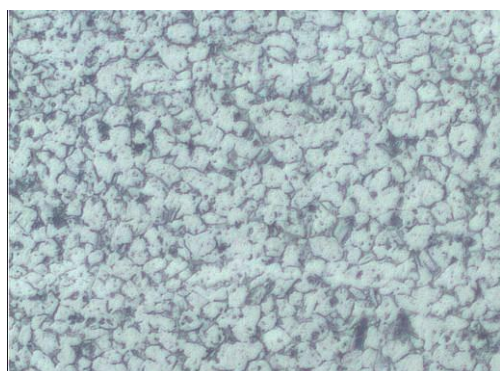
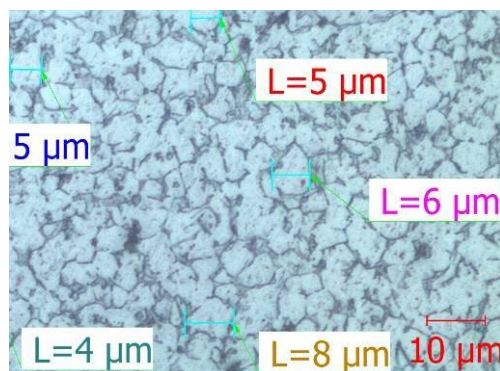


Рис. 6.15. Мікроструктура зразка №2 зі сплаву ВТ6





а) зб. 500

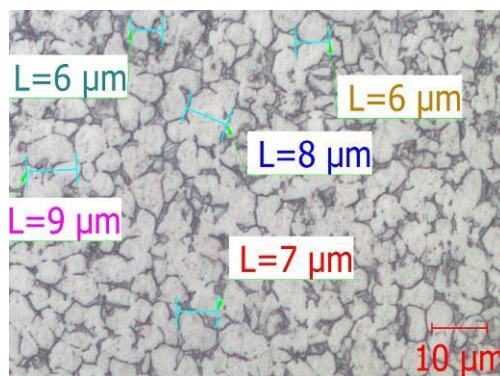


б) зб. 1000

Рис. 6.16. Мікроструктура зразка №3 зі сплаву ВТ6

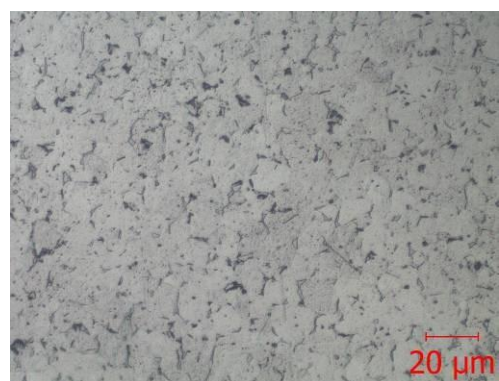


а) зб. 500

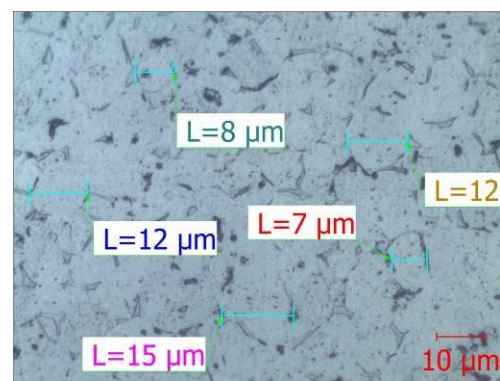


б) зб. 1000

Рис. 6.17. Мікроструктура зразка №8 зі сплаву ВТ6



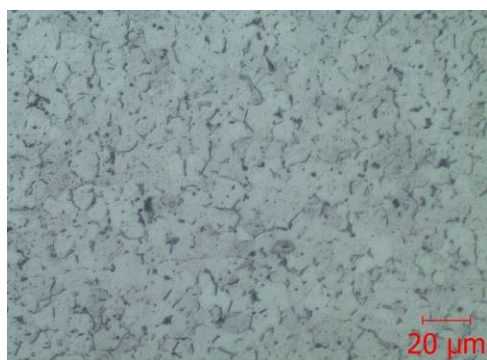
а) зб. 500



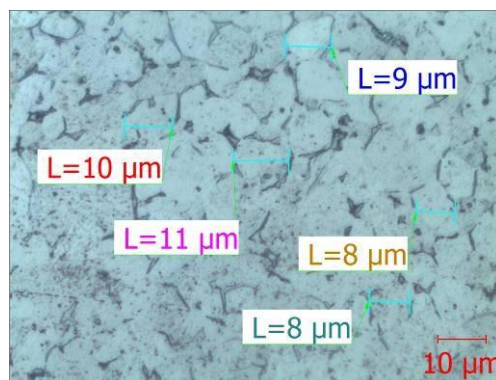
б) зб. 1000

Рис. 6.18. Мікроструктура зразка №4 зі сплаву ОТ4-0



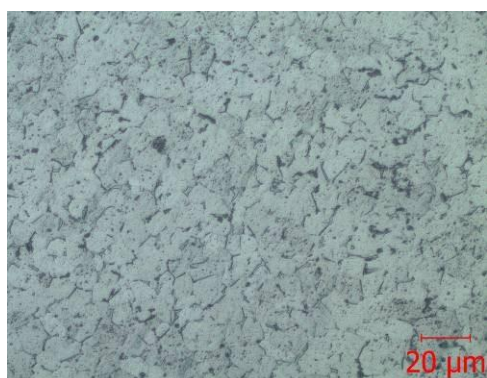


а) зб. 500

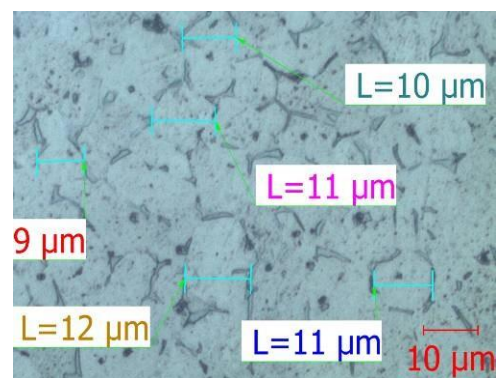


б) зб. 1000

Рис. 6.19. Мікроструктура зразка №5 зі сплаву ОТ4-0

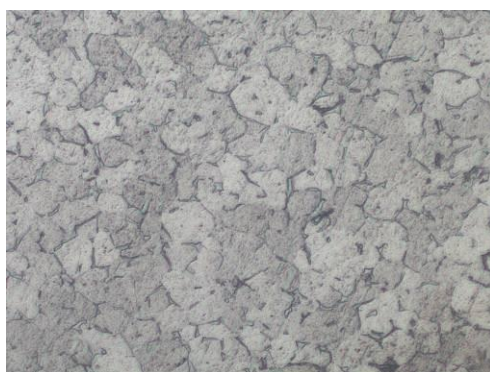


а) зб. 500

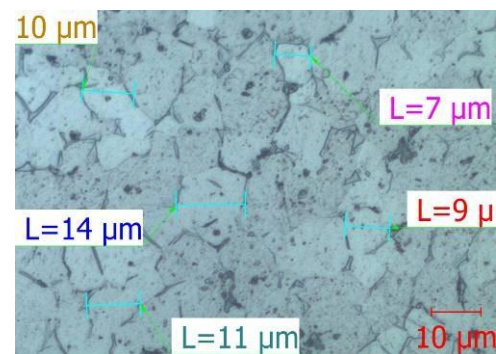


б) зб. 1000

Рис. 6.20. Мікроструктура зразка №6 зі сплаву ОТ4-0



а) зб. 500

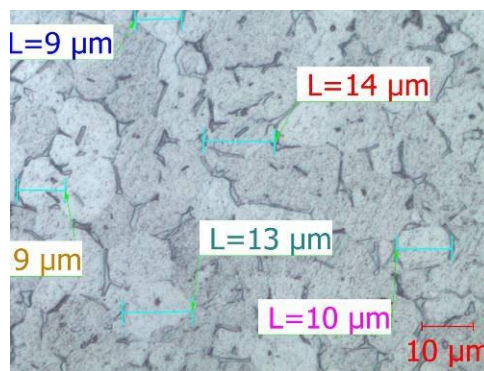


б) зб. 1000

Рис. 6.21. Мікроструктура зразка №7 зі сплаву ОТ4-0



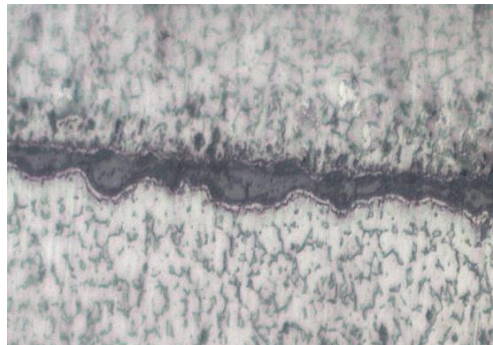
а) зб. 500



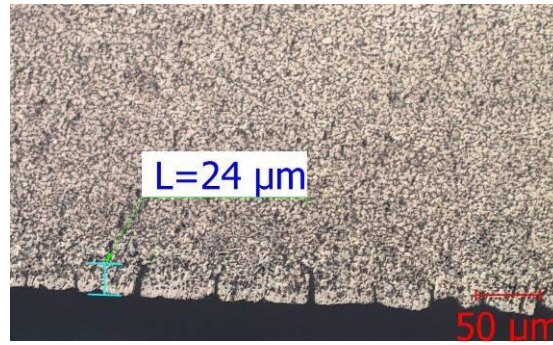
б) зб. 1000

Рис. 6.22. Мікроструктура зразка №9 зі сплаву ОТ4-0

У всіх зразках як зі сплаву ВТ6, так і сплаву ОТ4-0 по місцю з'єднання пластин виявлені переривчасті несплошності - зазори, заповнені окалиною, по контуру яких спостерігається окислений (альфірований) шар, також виявлений на решті поверхні пластин (рис. 6.23-6.31) . На окремих зразках (№1, 4, 9) альфірований шар супроводжується розтріскування (рис. 6.23, 6.27, 6.31).



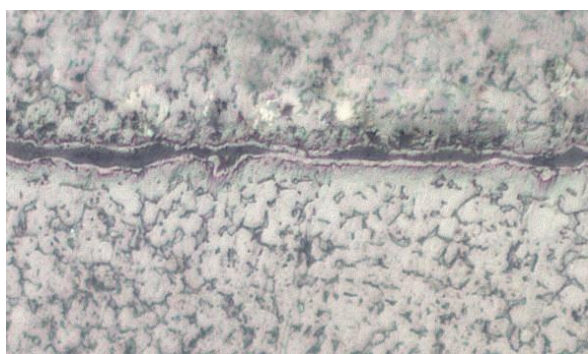
а) зб. 500



б) зб. 1000

Рис. 6.23. Мікроструктура зразка №1 зі сплаву ВТ6





а) зб. 500



б) зб. 1000

Рис. 6.24. Мікроструктура зразка №2 зі сплаву ВТ6

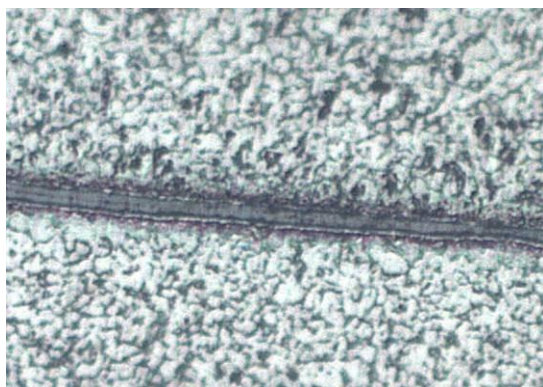


а) зб. 500

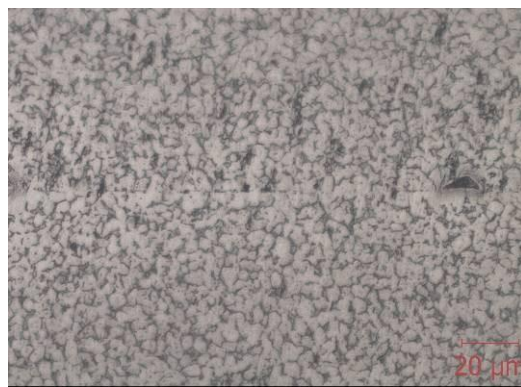


б) зб. 1000

Рис. 6.25. Мікроструктура зразка №3 зі сплаву ВТ6



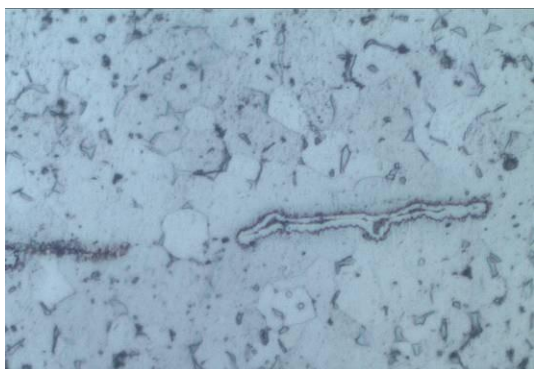
а) зб. 500



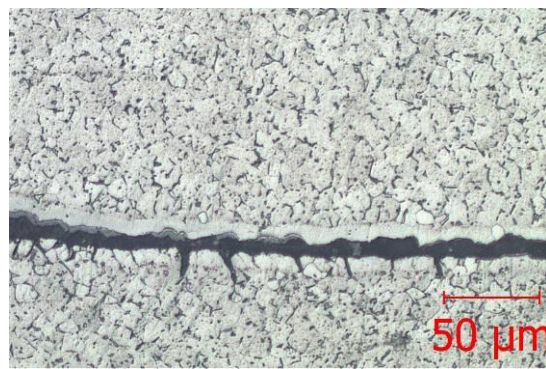
б) зб. 1000

Рис. 6.26. Мікроструктура зразка №8 зі сплаву ВТ6





а) зб. 500

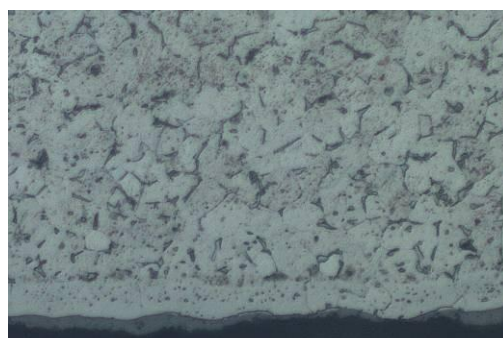


б) зб. 1000

Рис. 6.27. Мікроструктура зразка №4 зі сплаву ОТ4-0



а) зб. 500



б) зб. 1000

Рис. 6.28. Мікроструктура зразка №5 зі сплаву ОТ4-0

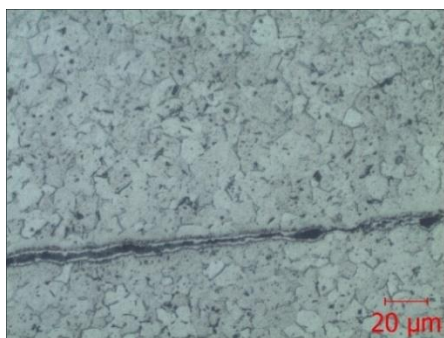


а) зб. 500



б) зб. 1000

Рис. 6.29. Мікроструктура зразка №6 зі сплаву ОТ4-0

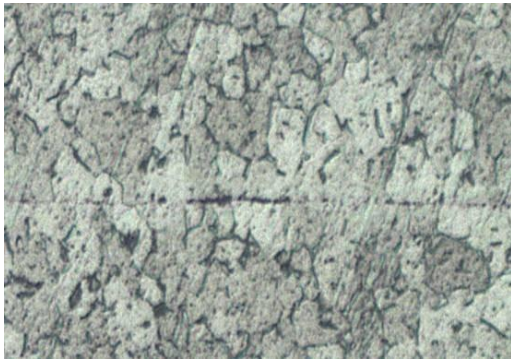


а) зб. 500

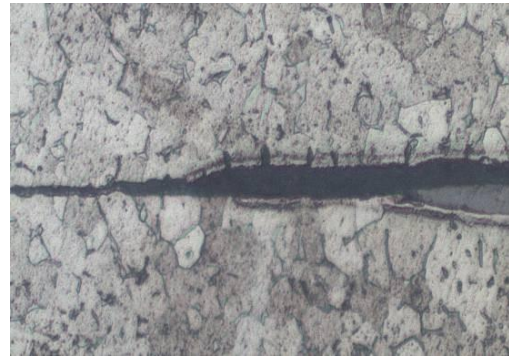


б) зб. 1000

Рис. 6.30. Мікроструктура зразка №7 зі сплаву ОТ4-0



а) зб. 500



б) зб. 1000

Рис. 6.31. Мікроструктура зразка №9 зі сплаву ОТ4-0

## 6.2. Експериментальне дослідження процесу формоутворення фрагментів порожнистої лопатки

Для формоутворення елемента порожнистої лопатки без наповнювача, дві титанові листові заготовки та штуцер (рис. 6.32.) герметично з'єднали зварюванням по контуру в вакуумній камері в середовищі аргону високого очищення.



а)



б)

Рис. 6.32. Етапи збирання заготовки: а) – заготовка до зварювання (товщина листа 0,5 мм); б) – заготовка після зварювання.

На поверхню оснащення обов'язково наноситься захисне покриття (рис. 6.33.), після цього заготовка поміщається між поверхнями двох матриць та з'єднуються болтами. Формоутворення відбувалось при  $830^{\circ}\text{C}$ , час витримки 45 хв, час формоутворення 60 хв тиском 3 атм.





Рис. 6.33. Етапи проведення експерименту формоутворення елемента порожнистої лопатки

Отримано елемент порожнистої лопатки з двох титанових листів сплаву ОТ4-0 товщиною 0,5мм (рис. 6.34.).

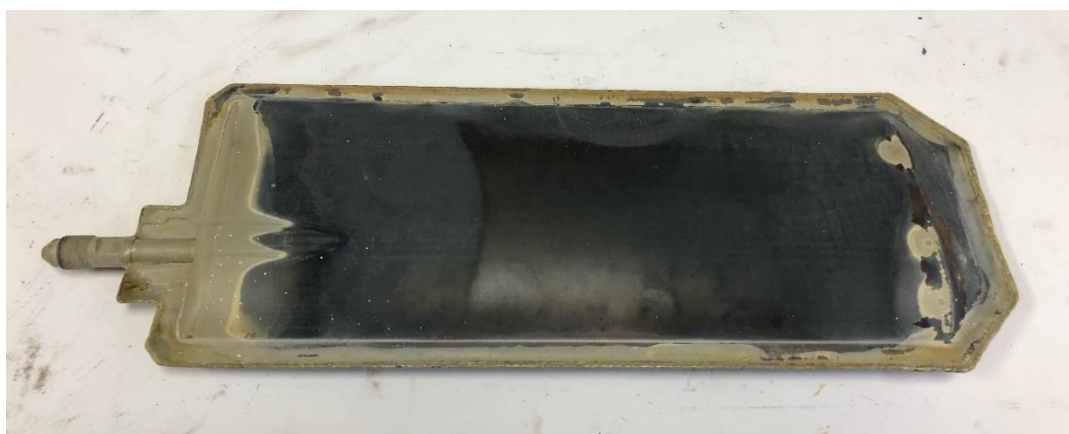


Рис. 6.34 . Фото отриманого зразка

### 6.3. Висновки до розділу 6

1. Експериментально визначено режими процесу виконання з'єднань листових заготовок обшивок та гофрового наповнювача з титанових сплавів методом зварювання тиском. Розроблено технологічне оснащення для відпрацювання режимів з'єднання пакету заготовок дифузійним зварюванням під тиском. Встановлено, що максимальна міцність з'єднання для сплаву ВТ6 досягається при температурі 920<sup>0</sup>С та витримки 60 хв під тиском 3 атм в середовищі аргон. Визначені режими використані при з'єднанні заготовок перед формоутворенням фрагменту порожнистої лопатки.

2. Експериментально відпрацьований процес формоутворення фрагменту порожнистої лопатки, запропоновані та реалізовані нові технічні рішення, що забезпечують його ефективність;

2. Узагальнені технічні рішення та розроблені технологічні рекомендації з їх впровадження. Проведена апробація процесів на підприємствах галузі.

## Загальні висновки

Вирішена актуальна науково-технічна задача розробки процесу пластичного формоутворення в ізотермічних умовах порожнистих вентиляторних лопаток з листових титанових сплавів для газотурбінних двигунів:

1. На основі огляду наукових публікацій та аналізу конструкторсько-технологічних рішень вентиляторних лопаток вибрана та обґрунтована конструкція фрагменту регулярного перерізу пера порожнистої лопатки гофрового типу для визначення параметрів технологічного процесу його формоутворення. На основі чисельного моделювання в CAD/CAE ANSYS, доведено, що для порожнистої вентиляторної лопатки гофрового типу рівень напружень на 10-15% нижче, ніж для лопатки суцільної конструкції.

Запропонована структура технологічного процесу виготовлення порожнистих лопаток, яка включає операції нанесення захисного покриття на поверхні заготовок, збирання заготовок в пакет, герметизування пакета по кромкам, зварювання під тиском та формоутворення пера лопатки тиском газового середовища в ізотермічних умовах;

2. Розроблена комплексна методика визначення параметрів процесу в'язкопластичного формоутворення в ізотермічних умовах фрагменту порожнистої лопатки регулярного перерізу обмеженої довжини з листових титанових сплавів. Точність визначення параметрів досягається шляхом порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень. Для забезпечення чисельного моделювання процесу в'язкопластичного формоутворення методом скінчених елементів з використанням програмних комплексів CAD/CAE DEFORM-3D та QFORM. Для забезпечення точності розрахунку в роботі розроблено експериментально-аналітичний метод визначення в'язкопластичної моделі матеріалу, що деформується, на основі випробувань на чистий згин при температурно-швидкісних умовах, які відповідають процесу формоутворення фрагменту лопатки. Встановлення зв'язку між інтенсивністю напружень та інтенсивністю швидкостей деформації



в моделі в'язкопластичного матеріалу здійснено шляхом використання фундаментальних положень теорії пластичної течії з описом поля швидкостей руху металу при згині в осередку деформації в просторово-часовій системі координат. Оптимізація констант моделі в'язкопластичного металу, що деформується, виконана з використанням екстремальних принципів теорії пластичних деформацій на основі експериментальних даних. Задача чисельного моделювання враховує границю деформівності титанового сплаву для відповідних температурно-швидкісних умов ізотермічного процесу та схеми напруженого стану. Обґрунтування теоретичних результатів виконано за допомогою натурного експерименту по формоутворенню фрагменту порожнистої лопатки;

3. Розроблено метод експериментально-аналітичної побудови в'язкопластичної моделі деформування титанового сплаву в ізотермічних умовах на підставі випробувань на згин. В основу методу покладено вирішення системи лінійних рівнянь рівноваги моментів внутрішніх та зовнішніх сил при чистому згині листових заготовок в ізотермічних умовах. Рівняння отримані теоретично на основі кінематичної моделі чистого згину, яка пов'язує геометричні параметри заготовки з компонентами тензора швидкостей деформацій матеріалу заготовки та часом її деформування. Для апроксимації моделі матеріалу використано ірраціональний поліном восьмого ступеня з невідомими лінійними коефіцієнтами. Для визначення системи лінійних рівнянь експериментально визначались залежність радіусу згину заготовки від часу деформування при постійному моменті навантаження і температурі деформування. Вирішення системи визначальних лінійних рівнянь дозволило отримати моделі апроксимації в'язкопластичного деформування для титанового сплаву ВТ6, який використаний в чисельному розрахунку. Визначені моделі в'язкопластичного деформування для листових титанових сплавів ВТ6 та ОТ4-0. Коректність моделей перевірена експериментально. Похибка визначення інтенсивності напружень в діапазоні швидкостей деформацій  $10^{-3} \dots 10^{-4} (с^{-1})$  не перевищує 10...14%. Оцінка похибки розрахунку напружень з використанням

кривої залежності  $\sigma(\varepsilon)$  по даним DEFORM в порівнянні з отриманими залежностями по розробленому методу, в інтервалі їх перекриття  $(-1 > \lg \varepsilon > -2)$  не перевищує 16-20%.

4. Для оцінки граничної величини накопиченої пластичної деформації в ізотермічних умовах гарячого деформування, запропоновано використання в критерії руйнування Кокрофта-Латема-Оха результатів експериментального формоутворення мембрани з листового матеріалу з показником жорсткості схеми напруженого стану +2 в центрі заготовки. Для відповідних температурних та швидкісних умов деформування експериментально встановлено, що максимальна величина пластичних деформацій для титанових сплавів складає 1,2 та відповідає інтервалу температур  $830^0 \pm 5^0 C$ ;

5. Чисельними розрахунками доведено, що стінка наповнювача деформується не рівномірно. Для зменшення висоти недоформовки необхідно зменшувати напруження формоутворення стінки наповнювача за рахунок:

- керування швидкістю деформацій при зміні величини тиску: зі зменшенням швидкості деформацій – зменшується зусилля розтягування стінки наповнювача;
- зменшення відносної товщини стінки наповнювача.

В інтервалі великих значень відносної висоти перерізу порожнистої лопатки ( $H/C \geq 1,2 \dots 1,5$ ) використання цих напрямів не дає ефективного результату. Тому автором було запропоновано нове конструкторсько-технологічне рішення, що захищено патентом України 141502 від 10.04.2020.

6. Експериментально визначено режими процесу виконання з'єднань листових заготовок обшивок та гофрового наповнювача з титанових сплавів методом зварювання тиском. Розроблено технологічне оснащення для відпрацювання режимів з'єднання пакету заготовок дифузійним зварюванням під тиском. Встановлено, що максимальна міцність з'єднання для сплаву ВТ6 досягається при температурі  $920^0C$  та витримки 60 хв під тиском 3 атм в

середовищі аргон. Визначені режими використані при з'єднанні заготовок перед формоутворенням фрагменту порожнистої лопатки.

7. Спроектовано та виготовлено оснащення для дифузійного зварювання та в'язкопластичного формоутворення фрагменту порожнистої лопатки з титанового сплаву ОТ4-0. Формоутворення здійснювалось газовим середовищем в ізотермічних умовах при температурі  $830^{\circ}\text{C}$  протягом 60 хв під тиском 3 атм.

8. За результатами роботи розроблені технологічні рекомендації по впровадженню процесу виготовлення порожнистих лопаток в серійне виробництво на АТ «Мотор Січ».

### Список використаних джерел

1. Широкохордные лопасти вентиляторов для ТРДД 5-6 поколений [Электронный ресурс] / Е.Н. Каблов, В.А. Скибин, Ю.А. Абузин та ін.] // По материалам ВИАМ. – 2005. – Режим доступа до ресурсу: <https://viam.ru/sites/default/files/scipub/2005/2005-204474.pdf>.
2. Fitzpatrick G. A. Rolls-Royce's Wide Chord Fan Blade – The Next Generation [Электронный ресурс] / G. A. Fitzpatrick, M. J. Cundy // Seventh World Conference on Titanium. – 1992. – Режим доступа до ресурсу: [https://cdn.ymaws.com/titanium.org/resource/resmgr/ZZ-WCTP1992-VOL3/1992\\_Vol.3-6-Rolls-Royces\\_Wi.pdf](https://cdn.ymaws.com/titanium.org/resource/resmgr/ZZ-WCTP1992-VOL3/1992_Vol.3-6-Rolls-Royces_Wi.pdf).
3. Genckin B.N. Способ изготовления профильных секционных лопаток сваркой давлением: пат США No 5170666, 1972. В23 К/01.
4. Доклад №627 консультативного совета НАТО по космическим исследованиям и разработкам. 1975. С. 25–30.
5. Fitzpatrick G. A. Rolls-Royce Wide Chord Fan Blade [Электронный ресурс] / G. A. Fitzpatrick, T. Broughton // International Conference on Titanium Products and Applications. – 1986. – Режим доступа до ресурсу: [https://cdn.ymaws.com/titanium.org/resource/resmgr/ZZ-WCTP1988-VOL3/1988\\_Vol.3-1-V-The\\_Diffusion.pdf](https://cdn.ymaws.com/titanium.org/resource/resmgr/ZZ-WCTP1988-VOL3/1988_Vol.3-1-V-The_Diffusion.pdf).
6. Halila G., Hansen K.I. Hollow airfoils. Патент Великобритании № 2254892 от 21.10.1992.
7. Cogan R.M. Способ изготовления фасонных изделий. Патент США № 3588990. 1971. В21к 3/04; В23р 15/ 02; 15/0
8. Разработка опытной технологии изготовления полый широкохордной лопасти вентилятора авиационного двигателя /Р.В. Сафиулин и др. //Авиадвигатели XXI века: сборник тезисов докладов. - Москва: ЦИАМ, 2015, с.479-481
9. M. W. Turner, I. J. Andrew. In: Book of Papers. 4th European Conference on Superplastic Forming. By IOM Communications Ltd. U. K. 39—46 (2005).

10. P. N. Comley. Materials Science Forum. Trans Tech Publications. 447—448, 233 (2004).
11. A. Wisbey, B. Geary, D. P. Davies and C. M. Ward — Close. Materials Science Forum. Trans Tech Publications. 170-172, 293—298 (2010).
12. L. D. Hefti. Journal of Materials Engineering and Performance. 17, 178—182 (2008)
13. Patent of Russian Federation No 2134308, 1999. (in Russian) [Патент РФ No 2134308, 1999].
14. G. A. Salischev, R. M. Galejev, O. R. Valiakhmetov. Journal of Materials Processing Technology. 116, 265—269 (2001).
15. V. V. Astanin. Vestnik UGATU. 2, 34—37 (2002). (in Russian) [В. В. Астанин. Вестник УГАТУ. 2, 34—37 (2002)].
16. E. N. Petrov, V. V. Rodionov, E. N. Kuzmin, R. Ya. Lutfullin, R. V. Safiullin. Cellular Structures. Snezhinsk, RFNC—VNIITF (2008) 176 p. (in Russian) [Е.Н. Петров, В.В. Родионов, Э.Н. Кузьмин, Р.Я. Лутфуллин, Р.В. Сафиуллин. Ячеистые конструкции. Снежинск, РФЯЦ-ВНИИТФ (2008) 176 с.]
17. Низкотемпературная сверхпластичность и изготовление полых конструкций из титанового сплава ВТ6 /Р.Я. Лутфуллин, А.А. Круглов, М.Х. Мухаметрахимов, О.А. Руденко //Письма о материалах, 2015, том 5, №2, с.185-188
18. R. Ya. Lutfullin, M. Kh. Mukhametrakhimov, A. A. Kruglov. Letters on Materials. 3(4), 292—295 (2013). (in Russian) [Р. Я. Лутфуллин, М. Х. Мухаметрахимов, А. А. Круглов. Письма о материалах. 3(4), 292—295 (2013).
19. O. A. Kaibyshev, R. V. Safiullin, R. Ya. Lutfullin. Materials Science and Technology. 22(3), 343—348 (2006).
20. O. R. Valiakhmetov, R. M. Galejev, V. A. Ivan'ko. Nanotechnologies in Russia. 5, 108—111 (2010)
21. Сверхпластическая формовка и сварка давлением многослойных полых конструкций Часть I. Международный опыт /Р.В. Сафиуллин //Письма о материалах, 2012, том 2, выпуск 1, с.32-35

22. Теория, технология и оборудование диффузионной сварки /В.А. Бачин, В.Ф. Квасниц, Д.И. Котельников и др.; Под общ. ред. В.А. Бачина. - М.: Машиностроение. - 2009. - 352с.

23. Расчеты режимов сварки давлением [Текст] / М. Х. Шоршоров, Э. С. Каракозов ; - Л. : ЛДНТП, 1969. - 31 с.

24. Диффузионная сварка титана с использованием давления на начальном этапе /В.В. Пешков и др. // Сварочное производство. - 2019, №1, с.32-36.

25. Richard R. , Thomas S. C. Hollow blade. Патент США No GB2147055 от 05.01.1985.

26. Collot A.C.F., Sohier B.P.C. Method of manufacturing a hollow blade for a turboshaft engine. Патент США No 5253419 от 19.10.1993.

27. Monds J.Le , Cheng J-H. and other. Method for manufacturing hollow airfoils (four -piece concept). Патент США No 5285573 от 15.02.1994.

28. Wiggs G.E., Hansen K.I., Kelly J.R. Design and processing method for manufacturing a hollow airfoils. Патент США No 5269058 от 14.12.1993.

29. Salemmе C.T., Murphy G.C. Metal spar/Superhybrid shell composite fan blades / Сообщение General Electric Comp. 1979.

30. Патент США Rolls -Royce Limited, Лондон, Великобритания. «Method of manufacturing a blade» No 5.711.068 от 27 января 1998, В 23 Р 15/00.

31. Скибин В.А., Солонин В.И. и др. – Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор). М.: ЦИАМ, 2004. - 422 с.

32. Иноземцев А.А. О программе создания авиационных газотурбинных двигателей пятого поколения семейства самолетов МС-21//Вестник Пермского научного центра, 2020, №4, с.28-46

33. Петров Е.Н., Родионов В.В., Кузьмин Э.Н., Лутфуллин Р.Я., Сафиулин Р.В. Ячеистые конструкции - Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2008. - 176с.

34. Сафиулин Р.В., Круглов А.А., Руденко О.А., Харин С.А., Сайранов А.Н., Морозов М.А., Тимохов В.А., Кропотов В.А. Разработка конструкции и

технологии изготовления облегченной широкохордной лопасти вентилятора авиадвигателя из титанового сплава //Титан, 2009, №4(26), с.34-39

35. European Patent No 0568201, 1993.

36. A. A. Kruglov, R. Ya. Lutfullin, M. Kh. Mukhametrakhimov. Journal of Advanced Materials. 6, 79—81 (2005) (in Russian) [А. А. Круглов, Р. Я. Лутфуллин, М. Х. Мухаметрахимов. Перспективные материалы. - 2005, №6, с.79—81]

37. Maehara Y., Komizo Y., Langdon T.G. Principles of Superplastic Diffusion Bonding, Mater. Sci. Technol., 1988, vol.4, pp.669 – 674.

38. C.H. Hamilton. AGARD Lecture Series 154, 1 (1987).

39. Serra D. Superplastic forming application on aero-engines. A review of ITP manufacturing processes. Proceedings of the 6th Europe Conference on Superplastic Forming, 2008, 10 pages. ([hal-00359685, version 1])

40. A.Kh. Akhunova, S.V. Dmitriev, A.R. Safiullin, R.V. Safiullin, F.F. Safin. Letters on Materials. 2 (2), 90—94 (2012). (in Russian) [А.Х. Ахунова, С.В. Дмитриев, Р.В. Сафиуллин, А.Р. Сафиуллин, Ф.Ф. Сафин. Письма о материалах.- 2012, № 2 (2), с. 90—94]

41. A.Kh. Akhunova, S.V. Dmitriev. Deformation and Fracture of Materials. 11, 40—44 (2009). (in Russian) [А.Х. Ахунова, С.В. Дмитриев. Деформация и разрушение материалов. - 2009. № 11, с40—44]

42. A. Kh. Akhunova, S. V. Dmitriev, A. A. Kruglov, R. V. Safiullin. Deformation and Fracture of Materials. 9, 38—41 (2010). (in Russian) [А. Х. Ахунова, С. В. Дмитриев, А. А. Круглов, Р. В. Сафиуллин. Деформация и разрушение материалов. - 2010, №9, 38—41]

43. A.R. Safiullin, A.A. Kruglov, R.V. Safiullin The useful model patent № 101949 (2011). (in Russian) [А.Р. Сафиуллин, А.А. Круглов, Р.В. Сафиуллин. Полое изделие с гофрированным наполнителем, патент на полезную модель. - 2011, №101949]

44. F. U. Enikeev. Proceedings of the higher academic institutions. Non-ferrous metallurgy. 1, 43—49 (2008). (in Russian) [Ф. У. Еникеев. Известия вузов. Цветная металлургия. - 2008. №1, с. 43—49]

45. A. Kh. Akhunova, S. V. Dmitriev, A.R. Safiullin, R.V. Safiullin, F.F. Safin. Journal of advanced materials. 15, 114—118 (2013). (in Russian) [А.Х. Ахунова, С.В. Дмитриев, Р.В. Сафиуллин, А. Р. Сафиуллин, Ф.Ф. Сафин. - Перспективные материалы. - 2013. - №15, 114—118]
46. A. Kh. Akhunova, A. I. Pshenichnyuk, S. V. Dmitriev, A. R. Safiullin, R. V. Safiullin. Deformation and Fracture of Materials. 7, 33—38 (2013). (in Russian) [А.Х. Ахунова, А.И. Пшеничнюк, С.В. Дмитриев, Р.В. Сафиуллин, А.Р. Сафиуллин. Деформация и разрушения материалов. - 2013. - №7. - с.33—38]
47. M.S. Nikitin, T.M. Zagirov, F.U. Enikeev. Engineering Technology. 8, 5—10 (2010). (in Russian) [М.С. Никитин, Т.М. Загиров, Ф.У. Еникеев. Технология машиностроения. – 2010. - №8. - с. 5—10]
48. A. Kruglov, R.Ya. Lutfullin. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2009. №1, p. 69—72 (in Russian) [А.А. Круглов, Р.Я. Лутфуллин. Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2009. - №1. - с.69—72]
49. R. Ya. Lutfullin, A. A. Kruglov, R. V. Safiullin. Materials Science and Engineering: A. - 2009. - 503, 52—59 (2009)
50. M. Kawasaki, R.B. Figueiredo, T.G. Langdon. Letters on Materials. 4 (2), 78—83 (2014).
51. R.Ya. Lutfullin, M.Kh. Mukhametrakhimov, A.A. Kruglov. Letters on Materials. 3(4), 292—295 (2013). (in Russian) [Р.Я. Лутфуллин, М.Х. Мухаметрахимов, А.А. Круглов. Письма о материалах. - 2013. -№3(4). - 292—295]
52. O. A. Rudenko, A. A. Kruglov, R. V. Safiullin. Kuznechno-Shtampovochное Proizvodstvo. 4, 5-10 (2006) (in Russian) [О.А. Руденко, А.А. Круглов, Р.В. Сафиуллин. - КШП. - 2006. №4, с. 5-10]
53. O. A. Kaibyshev, R. V. Safiullin, R. Ya. Lutfullin. Materials Science and Technology. - 2006. - №22(3). - с. 343-348
54. O. R. Valiakhmetov, R. M. Galeev, V. A. Ivan'ko. Nanotechnologies in Russia. - 2010. - №5. - с.108—111.



55. O.A. Kaibyshev. Superplasticity of Commercial Alloys. M. Metallurgija. (1984) 264 p. (in Russian) [О.А. Кайбышев. Сверхпластичность промышленных сплавов. М. Metallurgija. -1984. - 264 с.]

56. Способ изготовления полрой лопадки вентилятора ТРДД. Заявка 2855440 Франция, МПК 7 В 23 Р 15/04. SNECMA Moteurs SA, Ferte Jean Pierre, Franchet Jean Michel, Lhomme Daniel Gaston, Lorieux Alain Georges Henri (Brevalex).

57. Способ изготовления полых лопаток вентилятора ТРДД. Заявка 2855439. Франция, МПК 7 В 23 Р 15/04. SNECMA Moteurs SA, Ferte Jean Pierre, Franchet Jean Michel, Lhomme Daniel Gaston, Lorieux Alain Georges Henri (Brevalex).

58. Способ изготовления заготовки пустотелой лопадки для газотурбинного двигателя: Патент 2423216 Россия, МПК В23Р 15/04 (2006.01). САЛЮТ, Ноговицын Е.М., Имаев Т.Ф., Кудрявцев Ю.В., Пузанов С.Г., Трухинов Ю.В., Хижный Д.Э.

59. Способ изготовления заготовок широкохордных пустотелых лопаток вентилятора газотурбинного двигателя: Патент 2463125 Россия, МПК В21К 3/04 (2006.01). Корпорация ВСМПО-АВИСМА, Кропотов В.А.

60. Перспективная технология изготовления полрой широкохордной лопадки вентилятора /Р.Р. Мулюков, Р.В. Сафиулин и др. //Нанотехнологии и наноматериалы Пермского края: сборник статей - Пермь: Перм. ЦНТИ, 2009, с.61-65

61. Перспективная технология изготовления полрой широкохордной лопадки вентилятора /Р.Р. Мулюков, Р.В. Сафиулин и др. //Нанотехнологии и наноматериалы Пермского края: сборник статей - Пермь: Перм. ЦНТИ, 2009, с.61-65

62. Способ изготовления полрой вентиляторной лопадки: Патент 2477191 Россия, МПК В21D 53/78 (2006.01), В21D 26/02 (2011.01). ИПСМ РАН, Авиадвигатель, УМПО, Корп. ВСМПО-АВИСМА, Мулюков Р.Р., Иноземцев А.А. и др.

63. Методы контроля в производстве заготовок полых широкохордных лопаток вентиляторов современных газотурбинных двигателей /В.К. Бердин и др. //Научно-технический конгресс по двигателестроению: сборник тезисов - М., 15-17 апреля 2014, Часть 1, с.123-126

64. Анализ напряженного состояния в зоне перехода «замок» - «перо» полый широкохордной лопатки вентилятора /В.К. Бердин и др. //Научно-технический конгресс по двигателестроению: сборник тезисов — М., 2014, Часть 1, с.136-139

65. О формировании технических требований к полимерному материалу перспективной рабочей лопатки вентилятора ТРДД /Т.Д.Каримбаев и др. //Двигатель, 2015, №1, с.2-8

66. Разработка конструкции моноколеса вентилятора с полыми лопатками для ТРДД высокой степени двухконтурности /А. А. Коротыгин и др. //Труды МАИ: электронный журнал, 2012, выпуск 45

67. Облегченные широкохордные лопатки вентиляторов ТРДД. Особенности технологий их изготовления /Т.Д. Каримбаев, А.А. Луппов //Конверсия в машиностроении. – 2005 - №4/5.- с. 108-112

68. Математическое моделирование операций изотермической штамповки и сверхпластической формовки изготовления полый лопатки вентилятора /Ю.М. Темис, А.П. Худяков //Вестник УГАТУ. – 2015. - Том 19. - №3. - с.50-60

69. Широкохордная лопатка вентилятора фирмы Роллс-Ройс //Новости зарубежной науки и техники, серия «Авиационное двигателестроение». – 1988. - №3. - с.1-8.

70. Разработка подходов к моделированию и численному исследованию прочности полый широкохордной лопатки вентилятора с учетом ее конструктивных и технологических особенностей /Д.А. Елизаров и др. //Электронный ресурс <http://www.ssau.ru>

71. Исследования живучести сплошных и слоистых моделей применительно к лопаткам вентилятора /А.Н. Петухов //Двигатель. – 2010. - №2. – с. 10-14.

72. Анализ напряженно-деформированного и динамического состояния широкохордной лопатки вентилятора ТРДД /Ю.А. Гусев и др. //Вестник двигателестроения.- 2010.- №2. - с.109-113.

73. Потапов С.Д. Обеспечение прочностной надежности полый широкохордной лопатки вентилятора с учетом особенностей этапов ее жизненного цикла / С.Д. Потапов, Д.Д. Перепелица // Двигатель. – 2010. - №5(71). - с.30-32

74. Нихамкин М.Ш. Теоретические коэффициенты концентрации напряжений в полых лопатках вентилятора с повреждениями / М.Ш. Нихамкин, О.Л. Любчик //Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2012. - №32. - с.25-35.

75. Компьютерное моделирование процесса остывания полый лопатки ГТД после сверхпластической формовки /А.Т. Бикмеев и др. //Вестник УГАТУ. – 2012. – т. 16. - №7. - с.38-42

76. Шавнев А.А. Разработка технологии изготовления модельной пустотелой лопатки составной конструкции как одного из этапов освоения технологии получения полноразмерных широкохордных пустотелых лопаток вентилятора ГТД /А.А. Шавнев, Ю.А. Абузин, В.Н. Кочетов //Авиационные материалы и технологии. - 2005. - №2. - с.22-26.

77. Сравнение результатов моделирования сверхпластической формовки двух типов многослойных полых конструкций /А.Р. Сафиуллин и др. //Письма о материалах. – 2015. – т. 5. - №2. - с.2070-2010.

78. Использование эффекта низкотемпературной сверхпластичности в технологии сверхпластической формовки /О.А. Руденко, А.А. Круглов, Р.В. Сафиуллин и др. //Кузнечно-штамповочное производство - 2006. - №4. - С.5-9.

79. Кайбышев О.А. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов /О.А. Кайбышев, Ф.З. Утяшев. - М.: Наука, 2002.- 438с.

80. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности /О.М. Смирнов - М.: Машиностроение, 2009. - 184 с.

81. Пшеничнюк А.И. Структурные уровни сверхпластичности деформации: диссертация - Уфа: ИПСМ РАН, 2001. - 200с.
82. Осипов И.И. Высокоскоростная радиальная штамповка рабочих его использования в обработке металлов давлением / Я.М. Охрименко, О.М. Смирнов - М.: Машиностроение, 1971. - 32с.
83. Илюшин А.А. Пластичность - М.: изд-во АН СССР, 1999. - 272с.
84. Качанов Л.М. Основы теории пластичности - М.: Наука, 2010. - 420с.
85. К вопросу определения оптимальных условий сверхпластической деформации / М.И. Мазурский, Ф.У. Еникеев // Металлы. – 2008. - №4. - с.65-71.
86. Диффузионная сварка титановых конструкций: обзор /Л.С. Киреев и др. //Автоматическая сварка. – 2003. - №6. - с.42-47.
87. Новое поколение установок для диффузионной сварки разнородных материалов /А.В. Люшинский и др. // Сварщик. – 2007. - №3. - с.6-10.
88. К механизму образования соединения при диффузионной сварке титана / В.Р. Петренко и др. //Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2004. - №1. - с.134-135.
89. Уменьшение деформации трехслойных панелей с сотовым наполнителем при диффузионной сварке /В.Р. Петренко и др. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2004. - №1. - с.138-139.
90. Высокотемпературная ползучесть сплава ВТ9 в условиях диффузионной сварки /Л.В. Усачева и др. //Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2004. - №1. - с.139-140.
91. Проектирование, расчет и изготовление трехслойных конструкций, выполненных сверхпластическим формованием и диффузионной сваркой /Н.В. Кобелев и др. // Технология: межотраслевой научно-технический сборник ВИМИ, Серия «Конструкции из композиционных материалов. - 1992. - выпуск 1. - с. 3-11.
92. Установка для диффузионной сварки / А.В. Люшинский и др. //Технология машиностроения. – 2007. - №7. - с.44-47.

93. Аржакин А.Н. Диффузионная сварка титановых лопаток /А.Н. Аржакин // Сварочное производство. – 1994. - №6. - с.8-9.

94. Особенности диффузионной сварки титановых трехслойных конструкций с сотовым наполнителем /А.Б. Булков и др. //Технология машиностроения. – 2009. - №11. - с.26-32.

95. Авто вакуумирование в контактном зазоре при диффузионной сварке титана / В.В. Пешков и др. //Сварочное производство. – 2004. - №11. - с.15-20.

96. Диффузионная авто вакуумная сварка сплава ВТ20 /Л.В. Усачева и др. //Сварочное производство. – 2004. - №12. - с.11-15.

97. Кинетика уплотнения пористых титановых заготовок при их диффузионной сварке /Л.С. Киреев и др. // Автоматическая сварка. – 1994. - №5-6. - с.15-17.

98. Получение точных заготовок двуполочных лопаток из сплава ВТ6 диффузионной сваркой в сочетании с изотермической штамповкой /А.А. Гельман и др. //Авиационная промышленность. – 1988. - №12. - с.13-14.

99. О выборе режимов диффузионной сварки титановых сотовых пакетов /И.И. Муравьев и др. //Авиационная промышленность. – 1987. - №2. - с.48-49.

100. Гусев С.И. Выбор режимов сварки сотовых панелей / С.И. Гусев // Авиационная промышленность. – 1988. - №2. - с.61.

101. Исследование свариваемости титана в сравнении с другими сплавами в условиях газостатической диффузионной сварки /А.А. Гельман и др. // Технология легких сплавов. – 1997. - №3. - с.49-53.

102. Исследование деформированного состояния типовых элементов ребристых конструкции из титановых сплавов при диффузионной сварке / Л.М. Пучкова и др. // Сварочное производство. – 1991. - №11. - с.13-15.

103. Исследование характеристик прочности и усталости диффузионно-сварных панелей из сплава ВТ6ч / А.А. Гельман и др. // Металловедение и обработка титановых и жаропрочных сплавов: сборник статей — ВИЛС. – 1991. - с.149-155

104. Особенности диффузионной сварки титановых трехслойных конструкций с сотовым наполнителем / А.Б. Булков и др. // Сварочное производство. – 2009. - №11. - с.17-23.

105. Диффузионная сварка в градиентной теплометрии / О.А. Барабанова // Технология машиностроения. – 2012. - №8. - с.42-45.

106. Диффузионная сварка титанового сплава с аустенитной сталью через промежуточные покрытия / Н.В. Бойко и др. // Сварочное производство. – 2012. - №5. - с.43-47.

107. Механизм образования соединения при диффузионной сварке титана / В.В. Пешков и др. // Сварочное производство. - 2012. - №12. - с.23-29.

108. Влияние микрогеометрии поверхности на кинетику развития контакта при диффузионной сварке титана / А.Б. Булко и др. // Сварочное производство. – 2013. - №1. - с.14-20.

109. Влияние микрогеометрии поверхности на кинетику развития контакта при диффузионной сварке титана / А.Б. Булков и др. // Технология машиностроения. – 2013. - №2. - с.30-36.

110. Влияние технологических параметров на процесс диффузионной сварки титана / А.К. Булков и др. // Сварочное производство. – 2013. - №3. - с.15-21.

111. Кинетика развития физического контакта при диффузионной сварке титана / А.Б. Булков и др. // Сварочное производство. – 2013. - №10. - с.20-27.

112. Диффузионная сварка титановых заготовок через прослойку с высоким сопротивлением деформации / А.Б. Булков и др. // Сварочное производство. – 2013. - №11. - с.24-32.

113. Исследование высокотемпературной ползучести титана в условиях диффузионной сварки / А.Б. Булков и др. // Технология машиностроения. - 2013. - №12. - с.28-31.

114. Диффузионная сварка конструкций из титановых и алюминиевых сплавов на основе эффекта сверхпластичности / Е.Ю. Мастихин и др. // Сварочное производство. – 2014. - №12. - с.44-48.

115. Применение диффузионной сварки при изготовлении титановых элементов авиационного назначения / В.И. Муравьев, В.С. Пицык //Авиационная промышленность. – 2015. - №4. - с.25-31.

116. Влияние микроструктуры контактных поверхностей на развитие процесса соединения при диффузионной сварке титана /В.В. Пешков, А.Б. Булков //Сварочное производство. – 2017. - №8. - с.30-34.

117. Влияние микроструктуры контактных поверхностей на образование соединения при диффузионной сварке титана /В.В. Пешков и др. //Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. - том 13. - №2. - с.91-95.

118. Диффузионная сварка титана с использованием давления на начальном этапе / В.В. Пешков и др. // Сварочное производство. – 2019. - №1. - с.32-36.

119. Прочность лопатки компрессора авиационного двигателя при замене титанового сплава на композиционный материал /В.П. Павлов, Э.М. Нусратулин, А.А. Филиппов //Вестник УГАТУ. - 2011. - №4. - с.98-106

120. Анализ напряженно-деформированного и динамического состояния широкохордной лопатки вентилятора ТРДД /Ю.А. Гусев, Ф.Ф. Сиренко, В.В. Бойко //Вестник двигателестроения. - 2010. - №2. - С.109-113

121. Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство /А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. - М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ". - 2015. - 272с.

122. Биргер И.А. и др. Расчет на прочность деталей машин: справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич .- М.: Машиностроени. - 2003. - 640 с.

123. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью / Е.И. Исаченков - М.: Машиностроение. - 1967. - 367с.

124. Богуслаев В.А. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть 1 /В.А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко и др. - Запорожье: ОАО "МОТОР СИЧ". - 2013. - 420с.

125. Машошин О.Ф. Рабочие лопатки авиационных ГТД: конструкции, прочность, эксплуатация /О.Ф. Машошин, Б.А. Чичков - М.: МГТУ ГА. - 2017. - 80с.

126. Потапов С.Д. Обеспечение прочностной надежности полый широкохордной лопатки вентилятора с учетом особенностей этапов ее жизненного цикла /С.Д. Потапов, Д.Д. Перепелица //Двигатель. - 2020. - №5. - С.30-33

127. Оптимизация формы лопатки газовой турбины методами математического моделирования /Ф. А. Слободкина, В.В. Малинин, А.В. Малинин // Двигатель. - 2011. - №5. - С.28-30

128. Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование /В.Ф. Казанцев и др. // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2009. – вып. 46. – с. 43-46.

129. Ультразвуковое упрочнение деталей ГТД /М.К. Александров и др. //Вестник СГАУ. – 2011. - №3-1. - с.271-276.

130. Инновационные технологии ультразвуковой обработки /В.М. Приходько и др. //Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. - №7. - с.15-21.

131. Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование для упрочнения и пассивации наклепом: теория, технологические процессы и аппараты /С.Д. Шестаков //Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. - №7. - с.3-16.

132. Физическая акустика /под ред. У. Мэзона, пер. с англ. - М., 2010

133. Кудрявцев Е.А. Структура и механическое поведение ультрамелкозернистого двухфазного титанового сплава ВТ6 при низкотемпературной сверхпластической деформации: диссертация на соискание ученой степени кандидата техн. наук - Белгород. - 2016. - 172 с.

134. Кудрявцев Е.А. Исследование особенностей низкотемпературной сверхпластической формовки наноструктурного двухфазного титанового



сплава ВТ6 / Е.А. Кудрявцев, С.В. Жеребцов, Г.А. Салищев // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. - № 2. - с. 120–124.

135. Панченко, Е.В. Определение параметров уравнения сверхпластического состояния листовых материалов на двухосное растяжение / Е.В. Панченко // Проблемы прочности. - 1978. - № 8. - С. 31–35.

136. Колесников, А.В. Определение показателей сверхпластичности титанового сплава ОТ4-1 / А.В. Колесников, А.А. Чеславская, А.К. Шмаков // Вестник ИрГТУ. - 2015. - № 10(105). - с. 57–61.

137. Томленов, А.Д. Исследования в области обработки металлов давлением / А.Д. Томленов. - М.: Изд-во академии наук СССР, 1960. 67 с.

138. Исследование технологической наследственности при изготовлении детали ГТД из титановых сплавов: монография / В.А. Богуслаев, А.И. Долматов, П.Д. Жеманюк, В.С. Войтенко, И.В. Волков - Запорожье, 2010. - 120 с.

139. Богуслаев В.А. Повышение ресурса деталей ГТД из титановых сплавов: монография / В.А. Богуслаев, А.И. Долматов, П.Д. Жеманюк, В.В. Ткаченко, И.В. Волков - Запорожье, 2013. - 112 с.

140. Богуслаев В.А. Изготовление заготовок деталей газотурбинных двигателей из титановых сплавов: монография / В.А. Богуслаев, А.И. Долматов, В.С. Кривцов, П.Д. Жеманюк, А.Ф. Горбачев - Запорожье, 2010. - 290 с.

141. Богуслаев В.О., Качан О.Я., Долматов А.И., Корневський Є.Я., Мозговой В.Ф. Технологія виробництва авіаційних двигунів - Запоріжжя, 2015. - 330 с.

142. Способ диффузионной сварки слоистых титановых тонкостенных конструкций сложного профиля: пат. 2296656 РФ. № 2005130610/02; заявл. 03.10.2005; опубл. 10.04.2007.

143. Способ диффузионной сварки металлов и сплавов: пат. 2135337 РФ. № 99114123/02; заявл. 08.07.1999; опубл. 27.08.1999.

144. Способ диффузионной сварки двух элементов: пат. 2167749 РФ. № 99107941/02; заявл. 13.04.1999; опубл. 27.05.2001.

145. Способ сварки давлением с подогревом листовых материалов: пат. 1291336 SU. № 3976649/25-27; заявл. 12.11.1985; опубл. 23.02.1987. Бюл. №7.

146. Способ диффузионной сварки: пат. 2348496 РФ. № 2007112029/02; заявл. 02.04.2007; опубл. 10.10.2008.

147. Способ диффузионной сварки двух элементов: пат. 2164462 РФ. № 99107938/02; заявл. 13.04.1999; опубл. 10.04.2001.

148. Способ изготовления изделия путем сверхпластической формовки и диффузионной сварки: пат. 2291019 РФ. № 2005109282/02; заявл. 23.03.2005; опубл. 10.01.2007.

149. Пат. 2296246 Российская Федерация, МПК F 04 D 29/38. Способ получения широкохордной пустотелой лопадки вентилятора / Каблов Е.Н. и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственной унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» - № 2005134771/06; заявл. 10.11.2005; опубл. 10.11.2005.

150. Пат. 2210009 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 04 D 29/38. Лопатка осевого компрессора / Каримбаев Т.Д. и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственной унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения» им. П.И. Баранова - № 2001134273/06; заявл. 20.12.2001; опубл. 10.08.2003.

151. Пат. 2417147 Российская Федерация, МПК В 23 Р 15/04. Способ изготовления широкохордной полый лопатки компрессора газотурбинного двигателя / Елисеев Ю.С. и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Московское машиностроительное производственное предприятие «САЛЮТ»» - № 2009138411/02; заявл. 19.10.2009; опубл.

152. Пат. 2441729 Российская Федерация, МПК В 21 К 3/04. Способ изготовления полый лопатки / Артемов Ф.Е. и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Московское машиностроительное производственное предприятие «САЛЮТ»» - № 2010138999/02; заявл. 23.09.2010; опубл. 10.02.2012, Бюл. 4

153. Pat. 1754857 Europe, Int. Cl.<sup>5</sup> F 01 D 5/14, B 23 P 15/04, F 01 D 5/18. Hollow fan blade detail half, hollow fan blade for turbine engine and corresponding manufacturing method / Weisse, Michael A. ; proprietor United Technologies Corporation Hartford - № 06254199.0; date of filling 09.08.2006; date of publication 21.03.2012.

154. Pat. 2005/0002786 A1 United States Patent, Int. Cl.<sup>5</sup> B 23 H 1/14. Hollow fan blade for turbine engine and method of manufacturing such a blade / Jean-michel Franchet and other; proprietor SNECMA MOTEURS - №10/847860; date of filling 19.05.2004; date of publication 06.01.2005.

155. Frequency tuned hybrid blade: pat. 6033186 USA. № 9/293382 date of filling 16.04.1999; date of publication 07.03.2000.

156. Пат. 2268130 C2 Российская Федерация, МПК В 23 Р 15/04, В 23 К 26/30, В 23 К 101/04. Способ изготовления полой лопатки компонента статора или ротора / 2496Лундгрэн Ян и др.; заявитель и патентообладатель ВОЛЬВО АЭРО КОРПОРЕЙШН - № 2004109592/02; заявл. 14.08.2002; опубл. 10.06.2005, Бюл. № 02.

157. А. с. 985457 СССР, МПК F 04 D 29/38. Лопатка вентилятора/ А.В. Кузнецов и др. (СССР). - № 985457; заявл. 07.07.1981; опубл. 30.12.1982, Бюл. № 48.

158. Pat. 6739049 United States Patent, Int. Cl.<sup>3</sup> B 23 P 15/00. Method of manufacturing an article by diffusion bonding and superplastic forming /Stephen Nicholson; proprietor ROLLS-ROYCE plc London - № 0754586; date of filling 10.02.2003; date of publication 25.05.2004.

159. Method for fabrication of honeycomb structures: pat. 4117970 USA. № 742298 date of filling 16.11.1976; date of publication 03.10.1978.

160. Пат. 25526 Україна, МПК<sup>6</sup> F 04 D 17/00. Лопатка колеса радіального вентилятора / Васильєв Ю.В. та ін.; заявник і патентотримувач Державне підприємство Донецький державний науково-дослідний, проектно-конструкторський та експериментальний інститут комплексної механізації шахт

«ДОНДІПРОВУГЛЕМАШ» - № u200703872; заявл. 06.04.2007; опубл. 10.08.2007.

161. Пат. 2382911 Российская Федерация, МПК F 0 D 29/38. Полая лопатка вентиляторная / Потапов С.Д.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова». - № 2008142176/06; заявл. 24.10.2008; опубл. 27.02.2010; Бюл. 6.

162. Pat. 5240376 United States Patent, Int. Cl.<sup>5</sup> F 01 D 5/18. SPF/DB hollow core fan blade / Alexander Velicki and other; proprietor McDonnell Douglas Corporation - № 738270; date of filling 31.07.1991; date of publication 31.08.1993.

163. Pat. 5826332 United Stats, Int. Cl.<sup>6</sup> B 23 P 15/00. Method and manufacturing a hollow turbomachine blade / Mathieu Plilippe Albert Bichon and other; assignees Societe Nationale d`Etude et de Construction de Moteurs d`Aviation, Societe Dassault Aviation - № 721352; date of filling 26.09.1996; date of publication 27.10.1998.

164. Пат. 2464450 Российская Федерация, МПК F 04 D 29/38. Способ изготовления многослойной лопатки машина / Смыслов А.М. и др.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие Вакууммаш». - № 2011116376/06; заявл. 25.04.201

165. Method of fabricating metallic sandwich structure: pat. 4304821 USA. № 79781 date of filling 28.09.1979; date of publication 08.12.1981.

166. Method for making metallic sandwich structures: pat. 3927817 USA. № 560437 date of filling 20.03.1975; date of publication 23.12.1975.

167. Численный анализ вариантов конструкции пустотелой вентиляторной лопатки / О.А. Кайбышев, А.К. Галимов, А.А.Круглов, Р.Я. Лутфуллин, Р.В. Сафиуллин // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2004 -№1. – с.90-95.

168. Алексеев Ю.Н. Вопросы пластического течения металлов. - Харьков: Изв-во ХГУ, 1968. - 188 с.

169. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
170. Томленов А.Д. Теория гидростатического испытания листового металла / А.Д. Томленов // Вестник машиностроения.- 1958. - № 10 – С. 47-49.
171. Hill R. Theory of the Plastic Bulging of the Metal Diaphragm by Lateral Pressure – Philosophical Magazine, vol. 41, 1950, pp. 1133-1144.
172. Томленов А.Д. Вопросы теории вытяжки деталей сложной формы – Вестник машиностроения, 1958, № 1 – С. 53-56.
173. Расчет деформаций при формовке сложных деталей / Константинов Ю.С., Трахтенберг Ю.Б., Титов В.А., Максимчук Б.Я. – Организация и технология производства, 1975.
174. Вольмир А.С. Гибкие пластины и оболочки. - М.: Гостехиздат, 1956. - 419 с.
175. Шоршоров, М.Х. Сверхпластичность металлических материалов / М.Х. Шоршоров. - М.: Наука, 1973. - 219 с.
176. Смирнов-Аляев, Г.А. Экспериментальное исследование в обработке металлов давлением / Г.А. Смирнов-Аляев. – М.: Машиностроение, 1972. - 360 с.
177. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. Том 1. Элементарная теория и задачи / С.П. Тимошенко – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. - 373 с.
178. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев – Киев: Наукова думка, 1988. – 736 с.
179. Титов В.А. Метод экспериментально-аналитического построения кривых деформирования материалов при испытании на изгиб. Сообщение 1/ В.А. Титов, Т.Р. Гараненко // Обработка металлов давлением – 2015. -№2- с. 74-80.
180. Титов В.А. Особенности построения вязкопластических моделей металлов при испытании на изгиб. Сообщение 2 / В.А. Титов, Т.Р. Гараненко // Обработка металлов давлением – 2016. -№1- с. 45-51.
181. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением / В.А. Евстратов. – Харьков: Высшая школа, 1981. – 248 с.

182. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов / О.А. Кайбышев. – М.: Металлургия, 1975. – 280 с.
183. Лысов М.Н. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / М.Н. Лысов. – М.:Машиностроение, 1966. – 236 с.
184. Барышников М.П. К вопросу выбора критериев разрушения при математическом моделировании процессов обработки давлением в современных программных комплексах / М.П. Барышников, М.В. Чукин, А.Б. Бойко, Н.Н. Ильина // Обработка сплошных и слоистых материалов – 2014, №1 (40) – с. 48-55.
185. Барышников М.П. Анализ программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния композиционных материалов в процессах обработки давлением // М.П. Барышников, М.В. Чукин, А.Б. Бойко // Вестник магнитогорского ГТУ им. Г.Ц. Носова – 2012, №4. – с. 72-74.
186. Долгий Д.К. Моделирование процесса стабилизации высокопрочной холоднодеформированной арматуры / Д.К. Долгий, А.Г. Корчунов, М.П. Барышников // Вестник магнитогорского ГТУ им. Г.Ц. Носова – 2012, №2. – с. 43-47.
187. Guntram R. Modeling ductile damage of a Ni-base alloy considering the microstructure evolution during hot working // Steel Grips/ Journal of steel and Related Materials – 2006, №4-s. 56-63.
188. Орлюк М.В. Граничні значення критеріїв руйнування при моделюванні процесів витягування в середовищі DEFORM / Обработка материалов давлением – Краматорск, 2017, №2 (45). – с. 22-29.
189. Bao Y. A. Comparative study on various ductile crack formation criteria / Y. Bao, T. Wierzbicki // J Eng Mater Technol. – 2004. -No. 126.- p. 314-324
190. Bao Y. A. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space/ Y. Bao, T. Wierzbicki //International Journal of Mechanical Sciences. – 2004. - V. 46.- N. 1. - p. 81-98.

191. Михалевич В.М. Порівняльне дослідження моделей граничних пластичних деформацій / В.М. Михалевич, Ю.В. Добранюк, В.Щ. Краєвський // Вісник машинобудування та транспорту – 2018, № 2(8). – с. 56-64.

## Додаток А

### Список публікацій здобувача за темою дисертації

*Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації*

### Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Тітов В.А. Дослідження параметрів процесу ізотермічного пресування заготовок з титанових сплавів / Тітов В.А., Злочевська Н.К., Лавріненко А.Д., Гараненко Т.Р. // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Нові рішення в сучасних технологіях. – 2011. - №46 – с. 67-73. – ISSN 2079-5459. *Здобувачем створена математична модель і проведено чисельне дослідження.*

2. Мыленко А.А. Повышение предела выносливости широкохордных лопаток вентилятора газотурбинных двигателей в поле ультразвука / А.А. Мыленко, Рожковская Э.Л., Гараненко Т.Р. // Вестник двигателестроения. – 2014. - №1. – с. 67 – 70. - ISSN 1727-0219. *Здобувачем запропоновано використовувати метод підвищення витривалості широкохордної лопатки.*

3. Гараненко Т.Р. Численное исследование широкохордных полых рабочих лопаток вентилятора. / Гараненко Т.Р., Прибора Т.И., Березовский Е.К. // Вестник двигателестроения. – 2016. - №1. – с. 18 – 23. - ISSN 1727-0219. *Здобувачем проведено порівняльний аналіз з моделлю елементу регулярного профілю поперечного перерізу вентиляційної лопатки.*

4. Титов В.А. Метод экспериментально-аналитического построения кривых деформирования материалов при испытании на изгиб. Сообщение 1. Титов В.А., Гараненко Т.Р. // Обработка материалов давлением. – 2015. - № 2. – С. 74 – 80. - ISSN 2076-2151. *Здобувачем отримана залежність напружень від швидкостей деформацій для титанових сплавів та питомих моментів.*

5. Титов В.А. Особенности построения вязкопластических моделей металлов при испытаниях на изгиб. Сообщение 2. / Титов В.А., Гараненко Т.Р. // Обработка материалов давлением. – 2016. - № 1(42). – С. 45 – 51. - ISSN 2076-2151. *Здобувачем отримана залежність напружень від швидкостей деформацій для титанових сплавів та питомих моментів.*



6. Титов В.А. Особенности технической подготовки процесса изотермической штамповки моноколес / В.А. Титов, В.Ф. Мозговой, А.Ю. Басов, А.В. Титов, Т.Р. Гараненко, О.Н. Лысенко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2016. - № 3 (78). – С. 146-152. - ISSN 2305-9001. *Здобувачем визначено створена математична модель і проведено чисельне дослідження.*

7. Титов В.А. Некоторые закономерности изотермического вязкопластического формообразования мембраны из алюминиевых сплавов / В.А. Титов, А.С. Рехта, Т.Р. Гараненко / Обработка материалов давлением. – 2017. - №2 (45). – С. 30-35. - ISSN 2076-2151. *Здобувачем визначено граничну величину накопиченої пластичної деформації при формоутворенні мембрани з листового матеріалу.*

8. Розробка експериментальної методики та оцінки границі пластичної деформації титанового сплаву ОТ4-0 в умовах надпластичності / Тітов В.А., Гараненко Т.Р. // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. Машини і пластична деформація металу. – 2018. – с (273-278). *Здобувачем визначено граничну величину накопиченої пластичної деформації при формоутворенні мембрани з листового матеріалу.*

9. Development of an experimental technique and evaluate limit of plastic deformation of titanium alloy OT-4 under superplastic conditions / Vyacheslav Titov, Tetiana Garanenko // Solid State Phenomena – 2019, vol. 291, pp 183-192. (Входить до Scopus) *Здобувачем визначено граничну величину накопиченої пластичної деформації при формоутворенні мембрани з листового матеріалу.*

10. Конструкторсько – технологічні рішення типових елементів порожнистих лопаток // Тітов В.А., Гараненко Т.Р. / Проблеми тертя та зношування - 2019, - 3(84), - с. 69-75. – ISSN 0370-2197. *Здобувачем розроблено конструкторсько-технологічний класифікатор технічних рішень конструкції лопатки вентилятора та запропоновано конструкцію фрагменту порожнистої металеві лопатки гофрового типу.*

11. Титов В.А. Экспериментально-аналитический метод построения модели вязкопластичного материала для титанового сплава ВТ6 на основе

испытаний на изгиб / В.А. Титов, Т.Р.Гараненко, А.В. Титов // Mechanics and Advanced Technologies - 2019, - №3 (87), - с. 26-37.- ISSN 2521-1943. *Здобувачем визначено граничну величину накопиченої пластичної деформації при формоутворенні мембрани з листового матеріалу.*

12. Гараненко Т.Р. Розробка конструкторсько-технологічних рішень виготовлення порожнистої лопатки з титанових сплавів / Т.Р. Гараненко / Обработка материалов давлением. – 2019. - №2 (45). – С. 128-135. - ISSN 2076-2151. *Здобувачем розроблено конструкторсько-технологічний класифікатор технічних рішень конструкції лопатки вентилятора та запропоновано конструкцію фрагменту порожнистої металевої лопатки гофрового типу.*

**Додаток Б**  
**Акти впровадження**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Головний інженер

АТ «МОТОР СІЧ»

кандидат технічних наук



К.Б.Балушок

2021р.

**ДОВІДКА**

про використання результатів роботи по темі

**«Розробка процесу формоутворення порожнистої лопатки  
з титанових сплавів для газотурбінних двигунів»,**

виконаної в Механіко-машинобудівному інституті Національного технічного  
університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

( керівник роботи – проф. В.А.Тітов,

відповідальний виконавець – Т.Р.Гараненко)

В роботі представлені результати комплексних науково-дослідних досліджень з розробки технологічних основ виробництва порожнистих вентиляторних лопаток з титанових сплавів, удосконалення методів забезпечення їх конструкційної міцності та покращення формоутворення елементів порожнистої лопатки в умовах ізотермічного в'язкопластичного деформування.

Результати досліджень використовуються Підприємством при розробці та в доводці авіаційних ГТД, зокрема двигуна Д-36МБ.

Економічний ефект від використання наукових результатів роботи досягається за рахунок зниження маси вентиляторної лопатки завдяки використанню металевої порожнистої конструкції з гофровим типом наповнювача, поєднання двох процесів зварювання під тиском та в'язкопластичного деформування, показники яких можна бути визначити в кожному конкретному випадку створення АГТД.

Головний конструктор  
кандидат технічних наук

Ю.Ф.Басов

Начальник відділу міцності

І.Л.Гліксон